

УДК 669.017.16:639.2:620.18

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАЛОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ НА МОРФОЛОГИЮ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ

БОЛЬШАКОВ В.И.¹, *д.т.н., проф.*

РОТТ Н.А.^{2*}, *к.т.н.*

¹Кафедра материаловедение и обработки материалов ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24^а, г. Днепропетровск, Украина, 49005, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473.

^{2*}Кафедра материаловедение и обработки материалов ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24^а, г. Днепропетровск, Украина, 49005, (0562)46-64-62, e-mail: aspirant@mail.pgasa.dp.ua. ORCID ID: 0000-0002-3839-6405.

Аннотация: Повышение качества отливок путем подведения к затвердевающему металлу вибраций малой удельной мощности до сих пор не получило широкого промышленного применения и требует дальнейшего изучения. В связи с этим работа, посвященная поиску путей улучшения структуры и повышения механических и эксплуатационных характеристик литых изделий на основе использования воздействия вибрационных колебаний на жидкий металл при затвердевании, является актуальной. Поэтому **целью** данной работы является изучение влияния вибрационного воздействия малой удельной мощности на морфологию заэвтектических силуминов. **Методика.** Вибрационную обработку осуществляли с использованием генератора электромагнитных колебаний мощностью 0,25 кВт с регулировкой частот в пределах 0 ... 300 Гц. **Результаты.** Получены экспериментальные данные подтверждающие положительное влияние вибрационного воздействия малой удельной мощности на структуру, морфологию механические свойства заэвтектических силуминов. **Научная новизна.** Впервые методом рентгеноструктурного анализа установлено, что под действием механических колебаний в структуре заэвтектического сплава Al-Si появляются признаки образования гексагональной модификации кремния. **Практическая значимость.** Маломощные вибрационные колебания, при выбранных условиях разливки, наиболее существенно влияют на структуру и прочность эвтектики при использовании частот звукового диапазона ~ 50 Гц. Такой подход дает возможность при малых затратах энергии эффективно влиять на структуру и свойства материалов, содержащих элементы эвтектической кристаллизации.

Ключевые слова: вибрация, малая удельная мощность, заэвтектические силумины

ВПЛИВ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІЇ МАЛОЇ ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ НА МОРФОЛОГІЯ ЗАЕВТЕКТИЧНИХ СИЛУМІНІВ

БОЛЬШАКОВ В.И.¹, *д.т.н., проф.*

РОТТ Н.О.^{2*}, *к.т.н.*

¹Кафедра матеріалознавства і обробки матеріалів ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва і архітектури», вул. Чернишевського, 24^а, м. Дніпропетровськ, Україна, 49005, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473.

^{2*}Кафедра матеріалознавства і обробки матеріалів ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва і архітектури», вул. Чернишевського, 24^а, м. Дніпропетровськ, Україна, 49005, (0562)46-64-62, e-mail: aspirant@mail.pgasa.dp.ua. ORCID ID: 0000-0002-3839-6405.

Анотація: Підвищення якості виливків шляхом підведення до затвердіваючого металу вібрацій малої питомої потужності досі не отримало широкого промислового застосування і вимагає подальшого вивчення. У зв'язку з цим робота, присвячена пошуку шляхів поліпшення структури та підвищення механічних та експлуатаційних характеристик литих виробів на основі використання впливу вібраційних коливань на рідкий метал при затвердванні, є актуальною. Тому **метою** даної роботи є вивчення впливу вібраційного впливу малої питомої потужності на морфологію заэвтектичних силумінів. **Методика.** Вібраційну обробку здійснювали з використанням генератора електромагнітних коливань потужністю 0,25 кВт з регулюванням частот в межах 0 ... 300 Гц. **Результати.** Отримано експериментальні дані підтверджують позитивний вплив вібраційної дії малої питомої потужності на структуру, морфологію механічні властивості заэвтектичних силумінів. **Наукова новизна.** Вперше методом рентгеноструктурного аналізу встановлено, що під дією механічних коливань в структурі заэвтектичних сплаву Al-Si з'являються ознаки утворення гексагональної модифікації кремнію. **Практична значимість.** Малопотужні вібраційні коливання, при вибраних умовах розливання, найбільш суттєво впливають на структуру і міцність евтектики при використанні частот звукового діапазону ~ 50 Гц. Такий підхід дає можливість при малих витратах енергії ефективно впливати на структуру і властивості матеріалів, які містять елементи евтектичною кристалізації.

Ключові слова: вібрація, мала питома потужність, заэвтектичних силуміни

THE EFFECT OF VIBRATIONAL IMPACT OF LOW POWER DENSITY ON THE MORFOLOGY OF HYPEREUTECTIC SILUMINS

BOLSHAKOV V.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*
ROTT N.O.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.)*

¹Department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24^A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473.

^{2*}¹Department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24^A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, (0562)46-64-62, e-mail: aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405.

Abstract: Improving the quality of castings by bringing to the solidifying metal vibrations of small power density is still not widely industrial applications and requires further study. In connection with this work is dedicated to finding ways to improve the structure and enhance the mechanical and operational characteristics of cast products based on the use of the impact of vibrations on the liquid metal during solidification, is relevant. **The aim** of this work is to study the effect of vibration exposure low power density on the morphology of hypereutectic silumin. **Methods.** Vibration treatment was performed using a generator of electromagnetic oscillations 0.25 kW with adjustable frequencies in the range 0 ... 300 Hz. **The Results.** Experimental data confirm the positive effect of the low power density vibration on the structure, morphology, mechanical properties of hypereutectic silumins. **Scientific novelty.** For the first time by X-ray analysis revealed that under the influence of mechanical vibrations in the structure of hypereutectic Al-Si alloy, there are signs of Education hexagonal silicon. **The practical significance.** Thin vibrating oscillations under the chosen conditions of casting, the most significant effect on the structure and strength of the eutectic using audio frequency range of 50 Hz ~. This approach allows for low energy consumption effectively influence the structure and properties of materials containing elements of eutectic crystallization.

Keywords: vibration, low power density, hypereutectic silumins.

Введение

Формирование мелкозернистой равномерной структуры в слитках является одним из наиболее важных условий получения высоких механических свойств готовых изделий. Благодаря многолетним исследованиям ряда научных школ материалов- и металлослов разработаны и внедрены в производства различные методы управления структурой литых материалов, что позволяет влиять на ряд их свойств.

В технической литературе изучению влияния механических колебаний на процессы кристаллизации посвящено большое количество публикаций. Однако единого мнения, на какие именно параметры и в какой степени они влияют, до сих пор нет. Поэтому повышение качества отливок путем подведения к затвердевающему металлу вибраций малой удельной мощности до сих пор не получило широкого промышленного применения и требует дальнейшего изучения.

В связи с этим работа, посвященная поиску путей улучшения структуры и повышения механических и эксплуатационных характеристик литых изделий на основе использования воздействия вибрационных колебаний на жидкий металл при затвердевании, является актуальной.

Цель работы

Целью данной работы является изучение влияния вибрационного воздействия малой удельной мощности на морфологию заэвтектических силуминов.

Методика

В качестве материала для исследований влияния вибраций различных частот был выбран алюминиевый сплав системы Al-Si (18 % Si).

Вибрационную обработку осуществляли с использованием генератора электромагнитных колебаний мощностью 0,25 кВт с регулировкой частот в пределах 0 ... 300 Гц, смонтированного на вибрационном столе, на котором осуществляли разливку экспериментальных образцов в формы, изготовленные из керамзитового кирпича.

Результаты исследований

Известно, что при затвердевании расплавов колебательные процессы в нем могут приводить к разрушению отдельных ветвей дендритов и даже осевых образований, влиять на капиллярные свойства расплавов и их смачивающую способность, в результате чего уменьшается величина зерна, снижается пористость и объем усадочных раковин, и, как следствие, повышаются механические свойства сплавов [1 – 14].

В работе [12] изучали влияние вибрации на затвердевание эвтектического сплава Al-Si (массовая доля Si 12%). Эти исследования были направлены на влияние механических вибраций, которые измельчают зерна и улучшают механические свойства. Было установлено, что степень охлаждения и измельчения зерна увеличивается с увеличением интенсивности вибраций, и зерно становится более однородным [12].

Однако в литературных источниках не сообщается о влиянии различных видов механической вибрации на формы роста и относительное количество кристаллизующихся фаз в сплавах эвтектического состава.

Основными структурными составляющими в силумине (рис. 1) являются псевдопервичные дендриты α -Al раствора и первичные кристаллы β -Si, которые, на первый взгляд имеют различные морфологические формы. Первичные кремневые кристаллы имеют сравнительно четкую кристаллическую огранку в виде прямоугольников и многогранников. Этим кристаллам свойственно образование двойников, в результате чего в плоскости шлифа наблюдаются ромбы, звезды различных порядков и т. д.

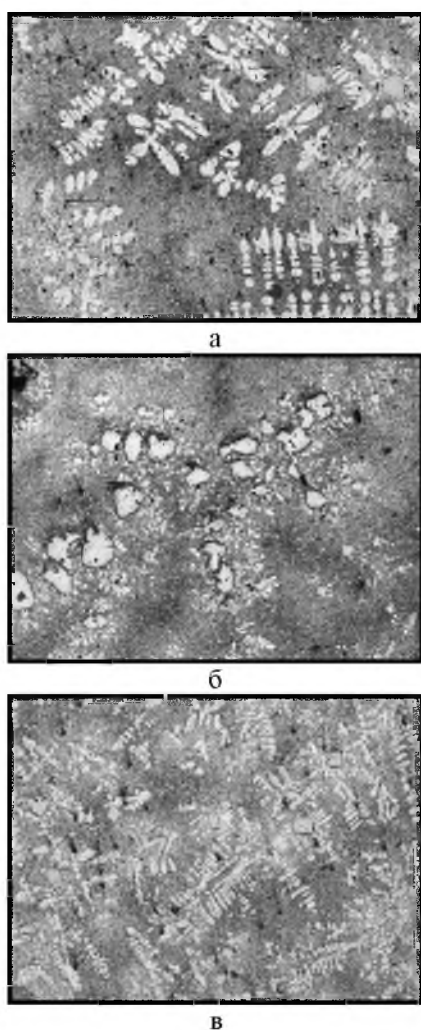


Рис. 1 Структура заэвтектического силумина, $\times 100$: а – без вибрационного воздействия; б – 50 Гц; в – 300 Гц. / The structure of hypereutectic silumin, $\times 100$: а – without vibration exposure; б – 50 Hz; в – 300 Hz.

Псевдопервичные кристаллы α -Al растут, в виде дендритов с четко выраженными осевыми стволами и ответвлениями второго и третьего порядка (рис. 1).

Рассмотрение деталей структуры

экспериментальных образцов сплава показал, что вибрационное воздействие малой удельной мощности не только увеличивает объемную долю кремния, но и несколько меняет морфологию его кристаллов от геометрически правильной к более разветвленной (рис. 2 а – в). При этом размеры и детали морфологии дендритов α -Al также подвержены изменению в сторону измельчения и возникновения дополнительных эффектов в ветвях второго порядка (рис. 2.)

Характерной особенностью описанного процесса изменения структуры является наличия алюминиевой оболочки, почти одинаковой толщины, вокруг кристаллизующегося псевдопервичного кремния (рис. 2 а). С приложением вибрационного воздействия эти оболочки наблюдаются реже или отсутствуют совсем (рис. 2 б – в), что указывает на существенное влияние вибрации на основополагающие принципы эвтектического затвердевания.

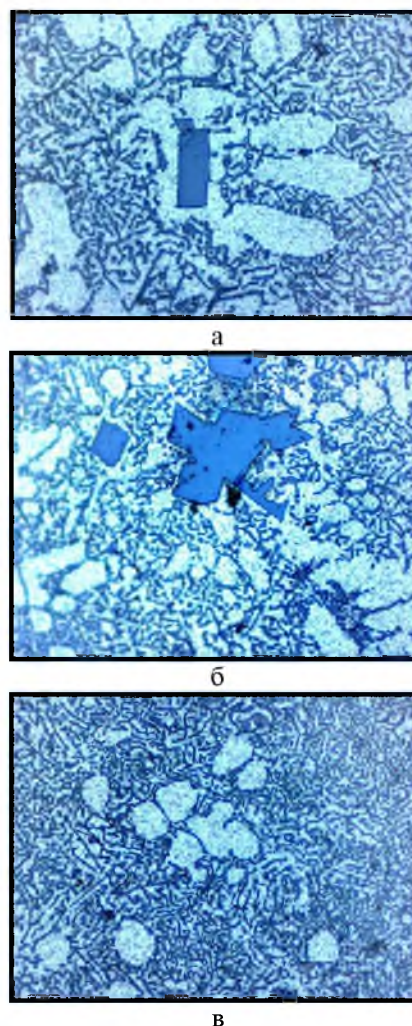


Рис. 2. Структура заэвтектического сплава Al-Si, $\times 500$: а – без вибрационного воздействия; б – с частотой вибрации 50 Гц; в – с частотой вибрации 300 Гц / The structure of hypereutectic alloy Al-Si, $\times 500$: а – without vibration exposure; б – the vibration frequency of 50 Hz; в – at a frequency of 300 Hz.

Важно отметить, что между индивидуальными кристаллами первичных фаз существует тесная связь, так как зарождение и последующий рост одного вызывает зарождение и рост другого на поверхности первого. И это периодически повторяется, результатом чего является образование цепочек, которые структурно подтверждают наличие таких процессов, которые предотвращают кооперативный рост в остальном оставшемся расплаве (см. рис. 3).

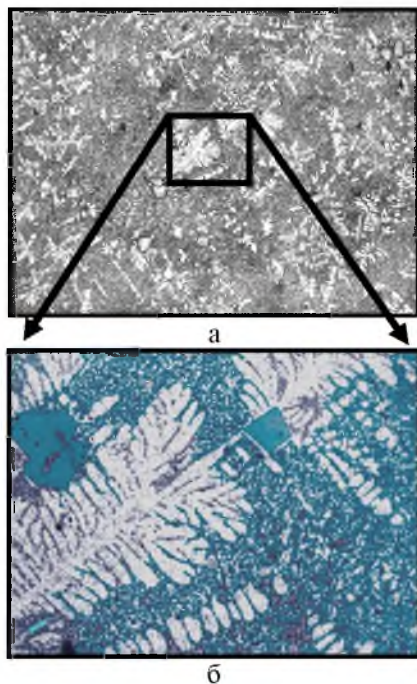


Рис. 3. Образование разветвленных дендритов алюминия на подложках из псевдопервичных кристаллов кремния: а – $\times 25$; б – $\times 500$ / The formation of branched dendrites of aluminum on substrates of silicon crystals pseudoprime: а – $\times 25$; б – $\times 500$

Строение эвтектических кристаллов кремния изучали методом растворения алюминиевой матрицы в хлорно-уксусном электролите. В результате такой процедуры поверхностные слои алюминия растворяются, обнажая каркасную природу эвтектических субкристаллов кремния (рис. 4.).

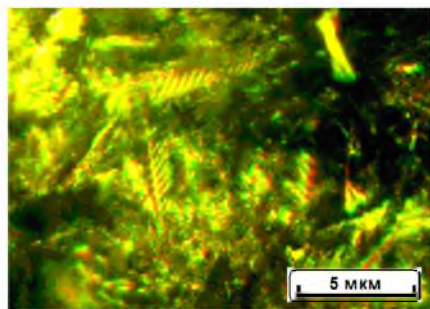


Рис. 4. Строение эвтектических субкристаллов кремния / The structure of the eutectic silicon subcrystals.

Снимок на рис. 4 сделан с помощью длиннофокусного объектива при максимальном увеличении фотообъектива, что дало возможность увеличить глубину резкости, необходимую для хорошего разрешения перьевидных дендритов кремния, лежащих на разных расстояниях от фокальной плоскости объектива.

Это позволило оценить размеры эвтектических дендритов кремния (до 5 мкм в длину) с развитыми ветвями второго порядка по плоскостям (110) ГЦК решетки кремния (см. рис. 4.).

Более детальное строение кремниевой составляющей эвтектики было прослежено с помощью растровой электронной микроскопии. Результаты представлены на рисунке 5. При больших увеличениях (рис. 5.) выявляется более сложная картина взаимодействия фаз (Si и Al) при эвтектическом затвердевании.

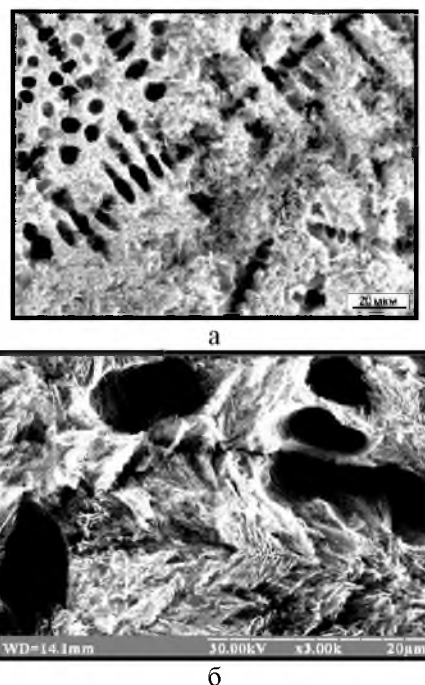


Рис. 5. Строение кремниевой составляющей эвтектики / The structure of eutectic silicon component.

Микротвердость заэвтектического силумина измеряли для установления ее зависимости от частотных характеристик применяемой вибрационной обработки. Для этого были выбраны кристаллы кремния как таковые, а также области с однородным строением эвтектики вдали от псевдопервичных кристаллов, как кремния, так и алюминия.

Результаты измерений приведены в таблице.

Результаты исследований микротвердости заэвтектического силумина показывают, что в упрочнение в результате приложения механических колебаний при затвердевании сплава вносят вклад все структурные составляющие, включая псевдопервичные и эвтектические компоненты.

Повышение частоты колебаний до 300 Гц слабо сказывается на твердости кремния и совсем не сказывается на повышении твердости эвтектики.

Таблица

Зависимость микротвердости сплава Al-Si от частоты вибрации / The dependence of the microhardness Al-Si alloy on the frequency of vibration

Частота вибрации, Гц	Значение микротвердости, МПа	
	Эвтектика	Si
0	192,6	2458,6
50	246,0	3207,0
300	191,0	3142,2

Поскольку при вибрационном воздействии с частотой 50 Гц одновременно увеличивается твердость как кристаллов кремния, так и эвтектической смеси на 20 ... 30 % возникает резонный вопрос о причинах, приводящих к данному феномену. Для ответа на данный вопрос провели рентгеноструктурные исследования. Результаты представлены на рисунках 6 – 7.

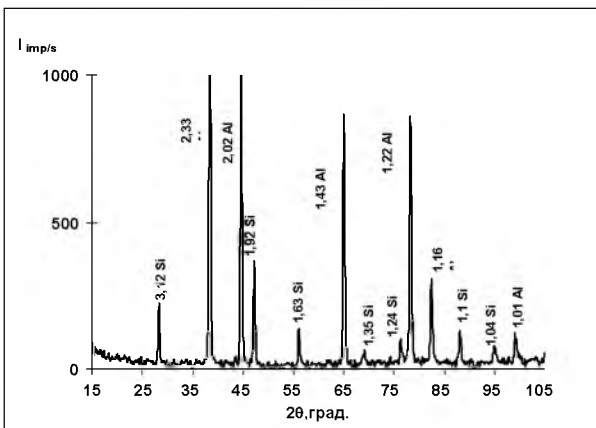


Рис. 6. Рентгеноструктурные исследования влияния вибрационной обработки на заэвтектический силумин без использования вибрации / X-ray studies of the effect of the vibration treatment on hypereutectic silumin without vibration.

Установлено, что на дифрактограммах затвердевших сплавов после воздействия на жидкотвердую фазу вибрационной обработкой в соответствии с режимом 50 Гц наблюдаются дополнительные линии, обозначенные как Si_g, отсутствующие на дифрактограммах исходных образцов (JCPDS 77-2111- S.G.: Fd3m; a-5,4199) (см. рис. 6 – 7.). В соответствии с (JCPDS 80-0005) на основании четырех линий ($d(\text{Å})= 3,2909-$ (100); $d(\text{Å})= 2,9138-$ (101); $d(\text{Å})= 2,2697-$ (102); $d(\text{Å})= 1,2927-$ (203)) эта модификация кремния идентифицирована, как гексагональная. Ее параметры приведены в JCPDS 80-0005- S.G.: P63m; a-3,8; c- 6,269; C- 1,6497. Подобный переход наблюдается при

трансформации классической (кубической) алмазной решетки углерода (JCPDS 06-0675; a-3,5667) в гексагональную модификацию лонсдейлит (JCPDS 19-0268- S.G.: P63mnc; a-2,52; c- 4,12; C- 1,6349), твердость которого выше, чем у алмаза.

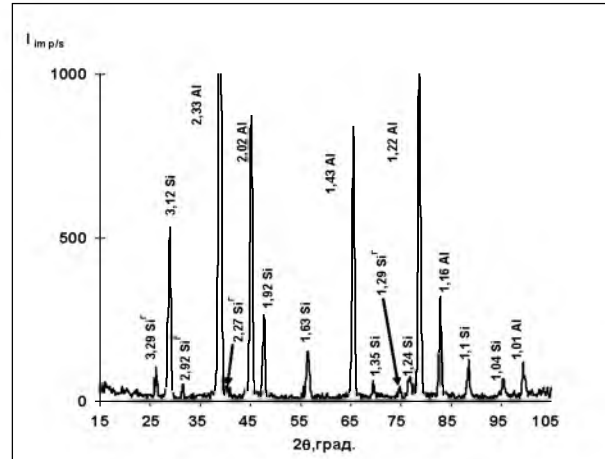


Рис. 7. Рентгеноструктурные исследования влияния вибрационной обработки на заэвтектический силумин с частотой вибрации 50 Гц / X-ray studies on the influence of vibration hypereutectic silumin treatment at a frequency of 50 Hz.

Вероятно, вклад гексагонального кремния в общую картину измерений приводит к повышению микротвердости первичных и псевдопервичных кристаллов.

Научная новизна и практическая значимость

Впервые методом рентгеноструктурного анализа установлено, что под действием механических колебаний в структуре заэвтектического сплава Al-Si появляются признаки образования гексагональной модификации кремния. Это имеет теоретическое значение для более полного понимания процессов затвердевания сплавов, содержащих кремний.

Впервые показано, что маломощные вибрационные колебания, при выбранных условиях разливки, наиболее существенно влияют на структуру и прочность эвтектики при использовании частот звукового диапазона ~ 50 Гц. Такой подход дает возможность при малых затратах энергии эффективно влиять на структуру и свойства материалов, содержащих элементы эвтектической кристаллизации.

Выводы

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что приложение вибрационных механических колебаний малой удельной мощности оказывает влияние на строение и механических показатели:

- способствует изменению морфологических признаков кремниевых кристаллов в сторону увеличения удельной поверхности;

- способствует дроблению псевдопервичных кристаллов алюминия;
- повышает твердость всех структурных составляющих.

Все зафиксированные положительные изменения в структуре и свойствах сопряжены с частотой 50 Гц, которая используется в переменном токе промышленного и гражданского энергоснабжения. Это позволяет предположить, что наблюдаемые эффекты влияния вибрации малой удельной мощности могут быть связаны именно с этими низкочастотными колебаниями и резонансными явлениями в системе источник – кристаллизующийся расплав.

Поскольку эти изменения происходят во всех структурных компонентах слитков, то в сумме они существенно способствуют повышению механических и эксплуатационных свойств отливок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- Xu H. Degassing of molten aluminum A356 alloy using ultrasonic vibration / H. Xu, X. Jiana, T. Meek, Q. Han // *Materials Letters*. Vol. 58. – 2004. – P. 3669–3673.
<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/886703-ohkArs/>
- Jian X. Refinement of eutectic silicon phase of aluminum A356 alloy using high-intensity ultrasonic vibration / X. Jian, T.T. Meek, Q. Han // *Scripta Materialia*. Vol. 54. – 2006. – N 5. – P. 893-896.
http://www.researchgate.net/publication/222293606_Refinement_of_eutectic_silicon_phase_of_aluminum_A356_alloy_using_high-intensity_ultrasonic_vibration
- Xu H. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy / H. Xu, X. Jiana, T. Meeka, Q. Han // *Materials Letters*. Vol. 59. – 2005. – P. 190 – 193.
http://mastersonics.com/documents/mmm_applications/ultrasonic_metallurgy/effect_of_power_ultrasound_on_solidification_of_aluminum_a356_alloy.pdf
- Zhong Z.Y. Production and Mechanical Properties of In-Situ Ti Alloying A356 Alloys / Z.Y. Zhong, H. Saka, T.H. Kim, E.A. Holm, Y.F. Han, X.S. Xie // *Materials Science Forum*. Vol. 475-479. – 1998. – P. 321-324.
http://www.researchgate.net/profile/Minlin_Zhong/citations?sorting=citationCount&page=1
- Mizutani Y. Effect of the electromagnetic vibration intensity on microstructural refinement of Al-7%Si alloy / Y. Mizutani, K. Miwa, K. Yasue, T. Tamura, Y. Sakaguchi, Y. Ohura // *Materials Transactions*. Vol. 45. – 2004. – N 6. – P. 1944-1948.
<https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/45/06/1944.pdf>
- Mizutani Y. Effect of the intensity and frequency of electromagnetic vibrations on refinement of primary silicon in Al-17%Si alloy / Y. Mizutani, K. Miwa, K. Yasue, T. Tamura, Y. Sakaguchi, S. Kawai // *Materials Transactions*. Vol. 45. – 2004. – N 6. – P. 1939-1943.
<http://mtb.misis.ru:591/OpacUnicode/index.php?url=/notice/s/index/IdNotice:413085/Source:default>
- Vives C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys: Part I. Solidification in the presence of crossed alternating electric fields and stationary magnetic fields // *Metallurgical and Materials Transactions*. Vol. 27B. – 1996. – N 3. – P. 445-455.
<http://serials.unibo.it/cgi-ser/start/en/spogli/ds-s.tcl?authors=%22+VIVES+C%22&language=ENGLISH>
- Vives C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys: Part II. Solidification in the presence of collinear variable and stationary magnetic fields // *Metallurgical and Materials Transactions*. Vol. 27B. – 1996. – N 3. – P. 457-640.
<http://serials.unibo.it/cgi-ser/start/en/spogli/ds-s.tcl?authors=%22+VIVES+C%22&language=ENGLISH>
- Robels Hernandez F.C. Novel image analysis to determine the Si modification for hypoeutectic and hypereutectic Al-Si alloys / F. C. Robels Hernandez, J. H. Sokolowski // *Journal of Metals*. Vol. 57. – 2005. – N 11. – P. 48 – 52.
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11837-005-0027-z>
- Abu-Dheir N. Silicon morphology modification in the eutectic Al-Si alloy using mechanical mold vibration / N. Abu-Dheir, M. Khraisheh, K. Saito, A. Male // *Mater. Sci. Engg*. Vol. A393. – 2005. – P. 109-117.
http://www.researchgate.net/publication/223448888_Silicon_morphology_modification_in_the_eutectic_AlSi_alloy_using_mechanical_mold_vibration
- Campbell J. Effects of vibration during solidification // *International Metals reviews*. Vol. 26. – 1981. – N 2. – P. 71-108.
<http://www.maneyonline.com/doi/abs/10.1179/imtr.1981.26.1.71>
- Deshpande J. The Effect of Mechanical Mold Vibration On Characteristics of Aluminum Alloys: Degree of Master of Science in Manufacturing Engineering: A Thesis Submitted to the Faculty of Worcester Polytechnic Institute / Jayesh Deshpande. – Worcester, 2006. – 113 p.
<https://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-092106-151830/unrestricted/DeshpandeJ.pdf>
- Pillai R.M. A simple inexpensive technique for enhancing density and mechanical properties of Al-Si alloys / R.M. Pillai, Biju K.S. Kumar, B.C. Pai // *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 146. – 2004. – N 3. – P. 338–348.
http://www.researchgate.net/publication/248251801_A_simple_inexpensive_technique_for_enhancing_density_and_mechanical_properties_of_AlSi_alloys
- Kokatepe K. Effect of low frequency vibration on macro and micro structure of LM6 alloys / K. Kokatepe, C. F. Burdett // *J. of Mater. Sci. and Eng*. Vol. 35. – 2000. – P. 3327-3335.
<http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1004891809731>

Статья рекомендована к публикации: д-ром.техн.наук, проф. Г. Д. Сухомлиным (Украина) и д-ром.техн.наук, проф. Д. В. Лаухиным (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015