

Научная статья
УДК 669.716:621.74
doi: 10.17223/7783494/4/6

Исследование влияния вибрационной обработки расплава на структуру и механические свойства эвтектической системы Al-Si

Николай Иверьевич Кахидзе¹, Рауль Габиденович Мубаракوف²,
Ирина Леонидовна Синкина³, Илья Александрович Жуков⁴

^{1, 2, 3, 4} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *kakhidze.n@yandex.ru*

² *raul.mub@mail.ru*

³ *sinkinairinal927@gmail.com*

⁴ *gofra930@gmail.com*

Аннотация. В результате проведённых исследований определено, что вибрационная обработка расплава в процессе кристаллизации эффективно модифицирует зёрнистую структуру α -Al. Применение резонансной вибрационной обработки расплава в процессе кристаллизации способствует измельчению размеров зёрен α -Al, однако не эффективно для дегазации расплава. Установлено, что вибрационная обработка расплава во время заливки обеспечивает получение отливок без видимой пористости, снижение среднего размера зерна α -Al, увеличение прочностных свойств.

Ключевые слова: алюминий, сплав алюминий-кремний, эвтектика, модифицирование, обработка расплава, вибрация, структура, пористость, плотность, твёрдость, прочность

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0028.

Для цитирования: Кахидзе Н.И., Мубаракوف Р.Г., Синкина И.Л., Жуков И.А. Исследование влияния вибрационной обработки расплава на структуру и механические свойства эвтектической системы Al-Si // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 4. С. 54–62. doi: 10.17223/7783494/4/6

Original article
doi: 10.17223/7783494/4/6

Study of the influence of vibration processing of the melt on the structure and mechanical properties of the Al-Si eutectic system

Nikolai I. Kakhidze¹, Raul G. Mubarakov², Irina L. Sinkina³, Ilya A. Zhukov⁴

^{1, 2, 3, 4} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *kakhidze.n@yandex.ru*

² *raul.mub@mail.ru*

³ *sinkinairinal927@gmail.com*

⁴ *gofra930@gmail.com*

Abstract. In industry, it is important to improve the quality of casting aluminum alloys. By means of vibration it is possible to control the crystallization process, and thereby obtain products with a given structure and properties. The aim of this work is to expand the understanding of the patterns of formation of the structural-phase state of cast aluminum alloys depending on the parameters of frequency, amplitude and time of vibration action on the crystallizing melt. It has been determined that vibration treatment of the melt during crystallization effectively modifies the grain structure of α -Al. The use of resonant vibration treatment of the melt during the crystallization process helps to refine the size of α -Al grains, but is not effective for degassing the melt.

Vibration processing of the melt during pouring with a frequency of 100 Hz and a vibration displacement of 102 μ m ensures a uniform distribution of pores throughout the volume of the casting, however, the number and total area of gas bubbles is higher in comparison with castings obtained during processing with lower frequencies. It has been established that vibration before complete crystallization contributes to the formation of increased porosity in castings. It has been established that vibration processing of the melt during pouring ensures the production of castings without visible porosity, refinement of the grain structure and increase in the strength properties of the eutectic Al-12Si alloy.

Keywords: aluminum, aluminum-silicon alloy, eutectic, modification, melt treatment, vibration, structure, porosity, density, hardness, strength

Acknowledgments: The research was carried out with financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (State assignment No. FSWM-2020-0028).

For citation: Kakhidze, N.I., Mubarakov, R.G., Sinkina, I.L. & Zhukov, I.A. (2023) Study of the influence of vibration processing of the melt on the structure and mechanical properties of the Al-Si eutectic system. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 4. pp. 54–62. doi: 10.17223/7783494/4/6 (In Russian).

Введение

Литьё – универсальный метод промышленного производства из алюминия, где широко используются сплавы Al-Si за счёт высоких параметров жидкотекучести и удельной прочности в сочетании с низкой стоимостью. По данным Союза машиностроителей России, ежегодное мировое производство алюминиевых отливок превышает 16 млн т, из которых в России производится менее 5%. Производство алюминиевых отливок в России по объемам выпуска существенно уступает Германии, Японии и США. Правительством РФ сформулированы основные цели и задачи развития литейного производства, среди которых – обновление базового литейного оборудования и технологий, повышение качества и рентабельности отливок.

Повышение качества литья, как правило, сводится к снижению микро- и макродефектов в получаемых отливках. Известен способ применения вибрационной обработки кристаллизующегося расплава; верно подобранные параметры вибрационной обработки способны свести к минимуму ликвации состава и такие макродефекты, как поры и усадочные раковины. Посредством вибрационного воздействия можно также управлять процессом кристаллизации и получать изделия с заданными структурой и свойствами.

В литературе встречаются альтернативные точки зрения на механизмы воздействия вибраций на структуру сплавов. Так, Н.И. Хворинов [1] отождествляет воздействие вибрации с механическим перемешиванием, когда обломки кристаллов разносятся по всему объему расплава и становятся затравками кристаллизации. По теории А. Оно [2] вибрация создаёт вынужденную конвекцию с переносом центров кристаллизации от стенок отливки к центру. Установлено, что вибрационные колебания разрушают оксидную плёнку расплава, контактирующего со стенкой формы, повышая теплоотвод и скорость охлаждения расплава. В.Л. Найдик и соавт. в работе [3] экспериментально доказали, что вибрационная энергия повышает теплоотвод от расплава к стенкам формы, увеличивая скорость кристаллизации на 25–30%. С.В. Морин [4] утверждает, что в результате вибрационного воздействия на расплав алюминия сводятся к минимуму такие литейные дефекты, как усадочные раковины и газовые всплытия, а также обеспечивается измельчение зеренной структуры за счёт более равномерного распределения в объеме модифицирующих

добавок и реализации циклической смены температуры на фронте кристаллизации.

Таким образом, цель данной работы – расширить представление о закономерностях формирования структурно-фазового состояния литейных алюминиевых сплавов в зависимости от параметров частоты, амплитуды и времени вибрационного воздействия на кристаллизующийся расплав.

Материалы и методы

Экспериментальные отливки диаметром 35 мм и высотой 200 мм из сплава марки АК12 были получены методом литья в стальной цилиндрический кокиль с толщиной стенки 45 мм. В ходе эксперимента исходный сплав расплавлялся в муфельной печи в графитово-шамотном тигле. Разливка расплава температурой 720°C производилась в тигель, разогретый до 300°C и установленный на вибростол (рис. 1). В процессе экспериментальных плавов производился контроль виброперемещения, частоты и времени приложения вибрационной обработки. Параметры вибрации измерялись с помощью виброметра МЕГЕОН 09630.

Плотность образцов полученных отливок определялась методом гидростатического взвешивания, твёрдость – на твердомере Металаб 703 с нагрузкой 62,5 кг на сферический индентор диаметром 2,5 мм и выдержкой 10 с. Микроструктура исследуемых сплавов изучалась по металлографическим шлифам на микроскопе Olympus GX71 с применением компенсатора Olympus U-TP530 после электрохимического травления. Эксперименты на растяжение проводились на электромеханической машине Instron 3369 по ГОСТ 1497-84 при скорости перемещения траверсы 0,1 мм/мин на образцах, вырезанных из нижних частей отливок на электроэрозионном станке.

Результаты и обсуждение

Колебания расплава в кокиле генерируются эксцентриковым двигателем, в котором интенсивность регулируется степенью удаления дебалансов от оси вала. Выявлено, что при фиксированном удалении дебалансов от оси вала с повышением частоты колебаний ν от 50 до 100 Гц повышается размах значений виброперемещения S от 99 ± 4 до 102 ± 30 мкм. На рис. 2 представлено продольное сечение отливок, полученных

при удалении дебалансов от центра на 10%. Как видно из представленных рисунков, в объёме отливок присутствуют поры преимущественно в центральной части. Вибрационная обработка расплава во время заливки с частотой 100 Гц и виброперемещением 102 ± 30 мкм обеспечивает равномерное распределение пор по

объёму отливки (рис. 2, *d*), однако количество и общая площадь газовых пузырей выше в сравнении с отливками, полученными при обработке с меньшими частотами. Установлено, что вибрационное воздействие до полной кристаллизации способствует образованию повышенной пористости отливок (рис. 2, *e*).

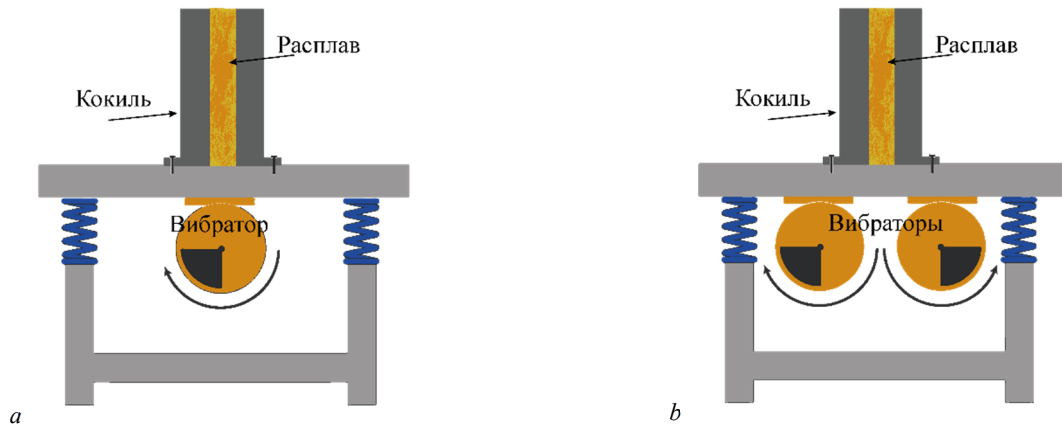


Рис. 1. Устройство вибростола при воздействии на расплав при заливке в кокиль: без резонанса (*a*) и с резонансом при работе двух вибраторов (*b*)

Fig. 1. Vibrating table design for impact on the melt during casting into coquille: without resonance (*a*) and with resonance at operation of two vibrators (*b*)

$S = 0$ мкм
 $\nu = 0$ Гц

a

$S = 103 \pm 12$ мкм
 $\nu = 50$ Гц
1 вибратор

b

$S = 172 \pm 27$ мкм
 $\nu = 50$ Гц
2 вибратора (резонанс)

c

$S = 144 \pm 22$ мкм
 $\nu = 100$ Гц
1 вибратор

d

$S = 99 \pm 27$ мкм
 $\nu = 75$ Гц
(до полной кристаллизации)

e



Рис. 2. Продольное сечение отливок АК12, полученных при вибрационной обработке с частотой и виброперемещением соответственно 0 Гц и 0 мкм (*a*); 50 Гц и 103 ± 12 мкм (*b*); 50 Гц и 172 ± 27 мкм с резонансом (*c*); 100 Гц и 144 ± 22 мкм (*d*); 75 Гц и 99 ± 27 мкм до полной кристаллизации (*e*)

Fig. 2. Longitudinal section of Al-12Si castings obtained by vibration treatment with frequency and vibration displacement respectively of 0 Hz and 0 μm (*a*); 50 Hz and 103 ± 12 μm (*b*); 50 Hz and 172 ± 27 μm (*c*); 100 Hz and 144 ± 22 μm (*d*); 75 Hz and 99 ± 27 μm until complete crystallization (*e*)

Эмпирическим методом установлено, что для дегазации расплава при получении отливок цилиндрического сечения из сплава АК12 эффективна вибрационная обработка во время заливки с частотой 60 Гц и виброперемещением 159 ± 3 мкм (рис. 3). При осмотре с применением измерительной лупы в объёме отливок поры не обнаружены.

Известно, что при литье в кокиль в приграничных участках отливки формируется зона столбчатых дендритных зёрен с параметром разности

$\langle a/b \rangle < 0,5$ (где b – хорда максимальной длины в зерне α -Al, a – хорда максимальной длины в зерне α -Al, перпендикулярная b ; рис. 4, а), что приводит к повышенной возможности образования горячих трещин, анизотропии свойств и пониженным механическим характеристикам. В результате исследования микроструктуры полученных отливок установлено, что применение вибрационной обработки положительно влияет на уменьшение параметра разности.



Рис. 3. Продольное сечение отливки АК12, полученной при вибрационной обработке во время заливки с частотой 60 Гц и виброперемещением 99 ± 4 мкм

Fig. 3. Longitudinal section of Al-12Si casting obtained by vibration treatment during pouring with frequency 60 Hz and vibration displacement 99 ± 4 μ m

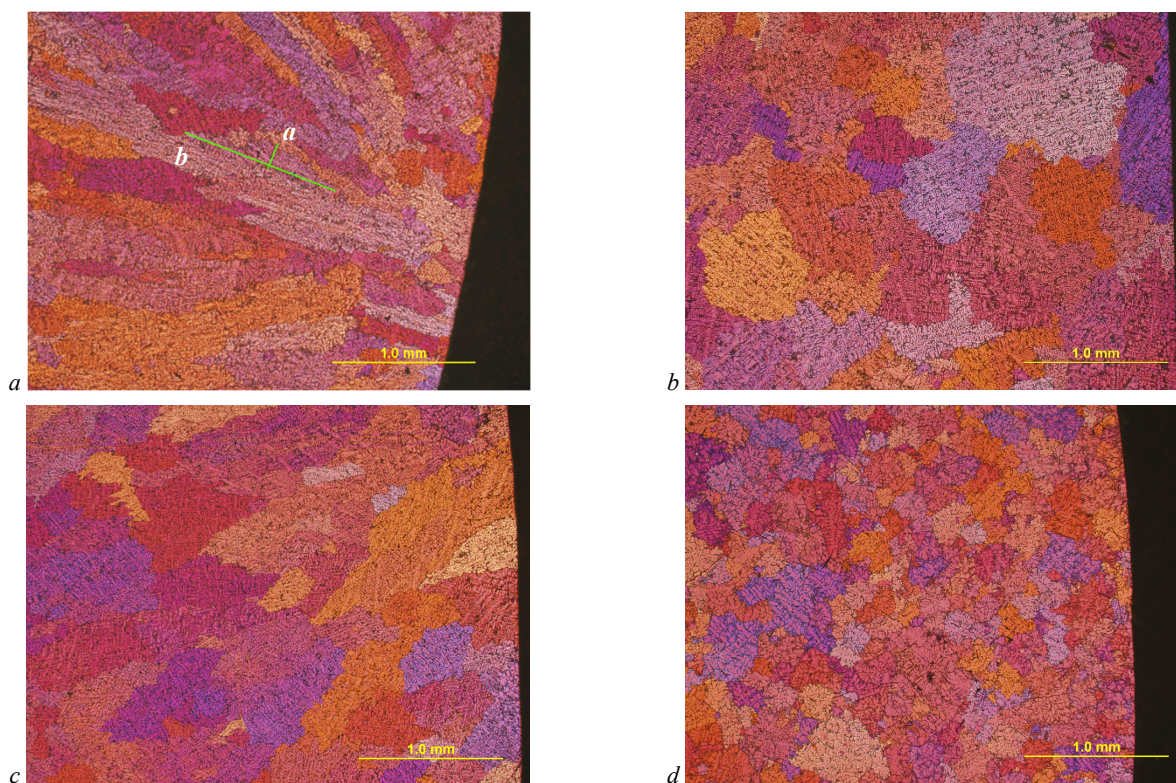


Рис. 4. Зона столбчатых дендритов в сплаве АК12 (а). Структура граничной с кокилем области сплава АК12, обработанного вибрациями с параметрами: $S = 47 \pm 3$ мкм и $\nu = 50$ Гц (b); $S = 99 \pm 4$ мкм и $\nu = 60$ Гц (c), $S = 94 \pm 24$ мкм и $\nu = 75$ Гц при резонансе (d)

Fig. 4. Zone of columnar dendrites in Al-12Si alloy (a). Structure of the boundary region of Al-12Si alloy treated by vibration with parameters: $S = 47 \pm 3$ μ m and $\nu = 50$ Hz (b); $S = 99 \pm 4$ μ m and $\nu = 60$ Hz (c), $S = 94 \pm 24$ μ m and $\nu = 75$ Hz at resonance (d)

В исходном сплаве АК12 формируются главные оси дендритов α -Al [5] с размером 181 ± 23 мкм и значением параметра $\langle a/b \rangle = 0,26$. В результате

вибрационной обработки с частотой колебаний 50–75 Гц и виброперемещением 85–115 мкм повышается значение параметра разности до 0,48–0,61.

Важно отметить, что обработка с частотой 50 Гц и виброперемещением 47 ± 3 мкм приводит к формированию крупных зёрен α -Al (509 ± 293 мкм; рис. 4, *b*), а резонанс способствует образованию зёрен α -Al меньших размеров (294 ± 123 мкм; рис. 4, *d*).

На рис. 5 представлена микроструктура центральных зон исследуемых отливок. Установлено, что вибрационная обработка расплава с частотой 60 Гц и виброперемещением 99 ± 4 мкм обеспечивает снижение среднего размера зерна $\langle d_{cp} \rangle$ α -Al с 520 ± 334 мкм

(структура исходного сплава без обработки; рис. 5, *a*) до 333 ± 162 мкм (рис. 5, *c*). В то же время вибрационная обработка расплава с резонансом способствует большему снижению среднего размера зерна α -Al.

Так, обработка расплава с $S = 94 \pm 24$ мкм и $\nu = 75$ Гц приводит к измельчению зерна α -Al до 227 ± 98 мкм, однако меньший размер зерен сочетается с наличием внутренних пор. Обработка расплава с виброперемещением и 85–100 мкм и частотой 50–60 Гц слабо влияет на размер α -Al, снижая значение $\langle d_{cp} \rangle$ на 7–15%.

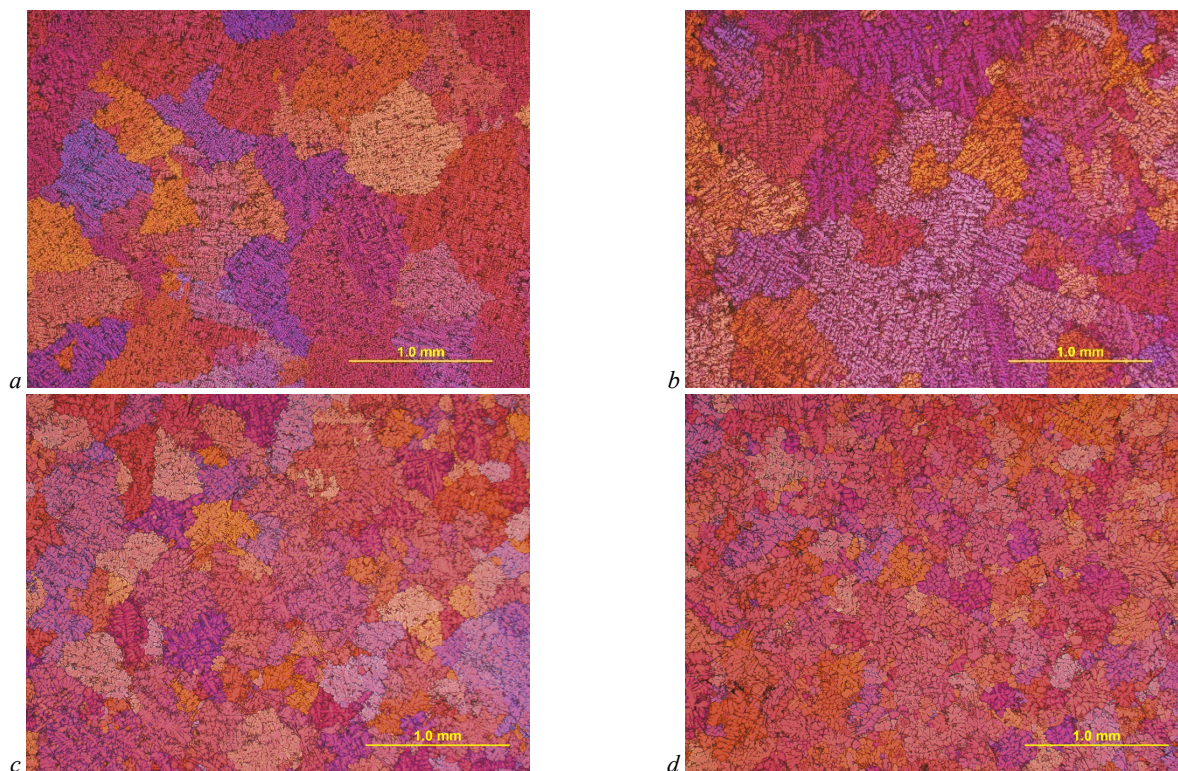


Рис. 5. Микроструктура в центральной части исследуемых отливок сплава АК12: без обработки расплава (*a*), с вибрационными параметрами $S = 47 \pm 3$ мкм и $\nu = 50$ Гц (*b*), $S = 99 \pm 4$ мкм и $\nu = 60$ Гц (*c*); $S = 94 \pm 24$ мкм и $\nu = 75$ Гц при резонансе (*d*)

Fig. 5. Microstructure in the central part of the investigated Al-12Si alloy castings: without melt treatment (*a*), with vibration parameters $S = 47 \pm 3$ μm and $\nu = 50$ Hz (*b*); $S = 99 \pm 4$ μm and $\nu = 60$ Hz (*c*), $S = 94 \pm 24$ μm and $\nu = 75$ Hz at resonance (*d*)

В рамках исследования микроструктуры полученных отливок определено, что с уменьшением среднего размера зерна α -Al в сплаве АК12 увеличивается размер дендритной ячейки (рис. 6). Так, в исходном сплаве АК12 без вибрационной обработки средний размер дендритной ячейки составляет $11,4 \pm 1,4$ мкм. Обработка расплава с резонансом при частоте колебаний 75 Гц и виброперемещении 94 ± 24 мкм приводит к уменьшению $\langle d_{cp} \rangle$ α -Al на 44% и увеличению дендритной ячейки до $28,8 \pm 3,6$ мкм.

По результатам измерения плотности исследуемых отливок установлено, что максимальные значения плотности фиксируются в нижней части 2,69–

2,71 г/см³ и близки к таковым сплава АК12 послековки (2,721 г/см³) [6]. Вибрационная обработка расплава во время заливки с частотой 60 Гц и виброперемещением 99 ± 4 мкм позволяет получать отливки со значениями плотности, однородными по высоте и близкими к компактным (табл. 1).

В нижних, центральных и верхних поперечных сечениях исследуемых отливок измерялись значения твердости согласно схеме на рис. 7. Установлено, что значения твердости во всех сечениях всех групп сплавов увеличиваются от центра к наружной части. В отливках АК12, полученных без вибрационной обработки расплава, значения твердости явно

коррелируют с показателями плотности по высоте отливок: минимальные значения твердости в средней части, где фиксируется максимальная пористость (табл. 1). Обработка расплава во время заливки с

частотой 60 Гц и виброперемещением 99 ± 4 мкм обеспечивает повышение значений твердости относительно аналогичных исследуемых участков отливок сплава без виброобработки.

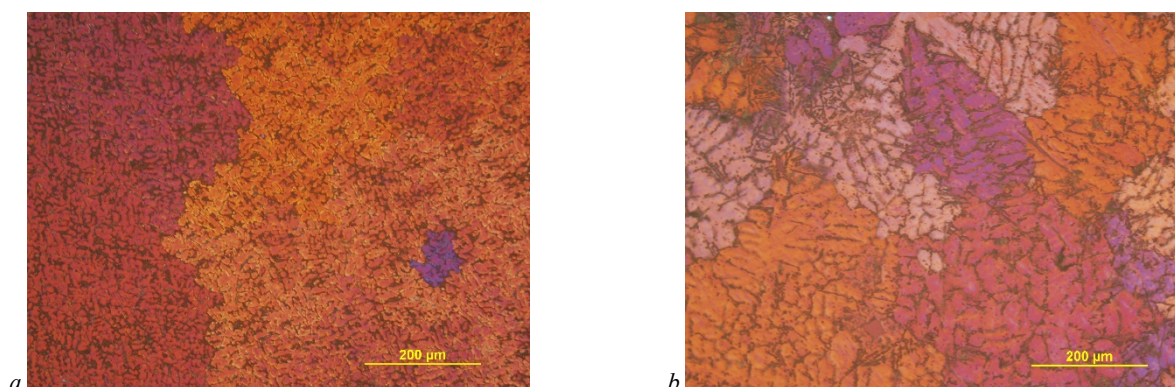


Рис. 6. Оптические изображения дендритных ячеек зёрен α -Al в отливках без обработки расплава (a) и с вибрационными параметрами $S = 94 \pm 24$ мкм и $v = 75$ Гц при резонансе (b)

Fig. 6. Optical images of dendritic cells of α -Al grains in castings without melt treatment (a) and with vibration parameters $S = 94 \pm 24$ μ m and $v = 75$ Hz at resonance (b)

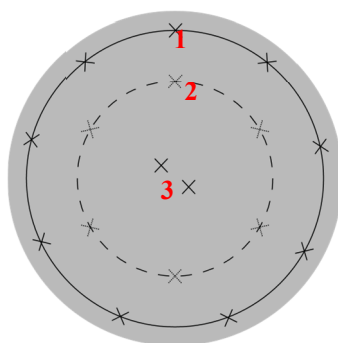


Рис. 7. Схема индентирования нижних, центральных и верхних поперечных сечений исследуемых отливок: 1 – зона уколов, близких к границе отливки; 3 – зона уколов центральной части отливки; 2 – зона уколов между зонами 1 и 3

Fig. 7. Scheme of indentation of the lower, central and upper cross-sections of the investigated castings: 1 – zone of indentation close to the casting boundary; 3 – zone of indentation of the central part of the casting; 2 – zone of indentation between zones 1 and 3

Т а б л и ц а 1

Значения плотности и твёрдости различных сегментов сплава АК12 с применением и без применения вибрационной обработки расплава

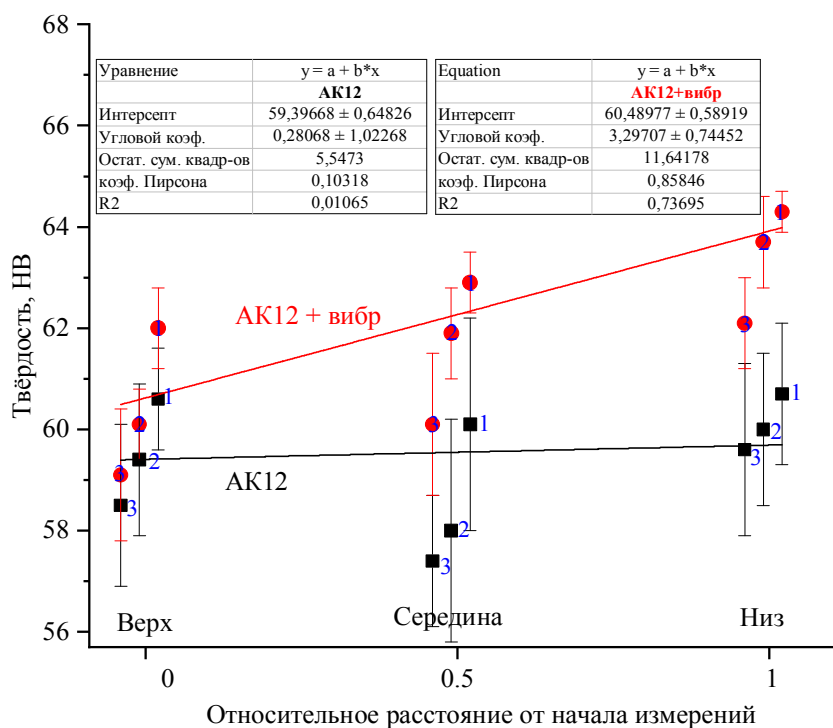
Параметры вибрации	Сегмент	Плотность, г/см ³	Твёрдость, НВ			R ²
			1	2	3	
$S = 99 \pm 4$ мкм $v = 60$ Гц	Верх	$2,70 \pm 0,01$	$62 \pm 0,8$	$60,1 \pm 0,7$	$59,1 \pm 1,3$	0,71521
	Середина	$2,71 \pm 0,01$	$62,9 \pm 0,6$	$61,9 \pm 0,9$	$60,1 \pm 1,4$	
	Низ	$2,71 \pm 0,01$	$64,3 \pm 0,4$	$63,7 \pm 0,9$	$62,1 \pm 0,9$	
$S = 0$ мкм $v = 0$ Гц	Верх	$2,68 \pm 0,01$	$60,6 \pm 1$	$59,4 \pm 1,5$	$58,5 \pm 1,6$	0,00608
	Середина	$2,66 \pm 0,03$	$60,1 \pm 2,1$	$58 \pm 2,2$	$57,4 \pm 1,3$	
	Низ	$2,69 \pm 0,01$	$60,7 \pm 1,4$	$60 \pm 1,5$	$59,6 \pm 1,7$	

Примечание: 1, 2, 3 – участки измерения твердости в поперечном сечении исследуемых отливок согласно схеме на рис. 7; R² – коэффициент детерминации аппроксимирующей прямой на рис. 8.

На рис. 8 представлены значения твердости отливок, приведенные в табл. 1, которые были аппроксимированы линейной функцией. Как известно, коэффициент детерминации R²

аппроксимирующей прямой – это показатель, характеризующий силу влияния группировочного признака на образование общей вариации. Коэффициент R^2 , соответствующий отливкам сплава АК12 с обработкой расплава во время заливки с частотой 60 Гц и виброперемещением 99 ± 4 мкм, равен 0,71521 и

много больше коэффициента, соответствующего аппроксимирующей прямой сплава без обработки (0,00608). Можно сделать вывод о существенно большей однородности по значениям твердости сплава, расплав которого подвергался вибрационному воздействию.



Участки 1, 2, 3 на графике – схема индентирования поперечных сечений отливок согласно схеме на рис. 7

Рис. 8. Зависимость значений твердости от участка исследуемых отливок и линейная аппроксимация значений твердости по всей отливке

Fig. 8. Dependence of hardness values on the section of the investigated castings and linear approximation of hardness values over the whole casting

Результаты расшифровки диаграмм нагружения исследуемых отливок представлены в табл. 2. Значения предела текучести, предела прочности и максимальных деформаций до разрушения сплава без применения вибрационной обработки составляют 152 МПа, 178 МПа и 2,4% соответственно. Обработка расплава вибрацией при кристаллизации

способствует повышению механических характеристик, максимальный эффект данного способа обработки достигается при частоте 60 Гц и виброперемещении 99 ± 4 мкм, что способствует повышению значений предела текучести от 152 до 196 МПа, предела прочности – от 178 до 241 МПа и максимальных деформаций до разрушения – от 2,4 до 4,4%.

Таблица 2

Значения $\langle d_{cp} \rangle$ и механических характеристик сплава АК12 с применением и без применения вибрационной обработки расплава

Сплав	$\langle d_{cp} \rangle$, мкм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	ϵ_{max} , %
S = 0 мкм $\nu = 0$ Гц	520 ± 334	152 ± 11	178 ± 17	$2,4 \pm 0,4$
S = 99 ± 4 мкм $\nu = 60$ Гц	333 ± 162	196 ± 7	241 ± 10	$4,4 \pm 0,5$
S = 94 ± 24 мкм $\nu = 75$ Гц резонанс	227 ± 98	179 ± 7	219 ± 11	$3,8 \pm 0,4$

Примечание: $\langle d_{cp} \rangle$ — средний размер зерна; $\sigma_{0,2}$ — предел текучести; σ_b — предел прочности; ϵ_{max} — максимальные деформации до разрушения.

В сплаве АК12 отмечается повышение значений предела текучести после вибрационной обработки расплава, что может быть связано с измельчением среднего размера зерна по закону Холла–Петча [7]:

$$\Delta\sigma_{H-P} = \frac{k_f}{\sqrt{D_0 - D_1}},$$

где D_0 и D_1 – средний размер зерна в исходном и модифицированном состоянии; k_f – параметр материала (для алюминиевых сплавов с размером зерна больше 100 мкм $\sim 5,2 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{1/2}$ [8]). Расчетный вклад $\Delta\sigma_{H-P}$ в повышение значений $\sigma_{0,2}$ сплава АК12, полученного при резонансной вибрационной обработке (см. табл. 2), составляет 61 МПа. Фактически же повышение значений $\sigma_{0,2}$ фиксируется на уровне 27 МПа, что должно быть связано с наличием пор в объеме слитка, препятствующих полному упрочнению от измельчения зеренной структуры. Это наглядно демонстрируется в слитках, полученных при обработке расплава с виброперемещением 99 ± 4 мкм и частотой 60 Гц без резонанса, обеспечивающей высокую плотность сплава. Расчетный вклад $\Delta\sigma_{H-P}$ данных слитков составляет 12 МПа, однако получение структуры без

видимой пористости обеспечивает повышение значений $\sigma_{0,2}$ сплава АК12 на 44 МПа со 125 до 196 МПа.

Выводы

Определено, что вибрационная обработка расплава в процессе кристаллизации эффективно модифицирует зеренную структуру α -Al. Вибрационная обработка положительно влияет на уменьшение параметра разноосности в граничной зоне отливок. Применение резонансной вибрационной обработки расплава в процессе кристаллизации способствует измельчению размеров зерен α -Al, однако не эффективно для дегазации расплава.

Установлено, что вибрационная обработка расплава во время заливки с частотой 60 Гц и виброперемещением 99 ± 4 мкм обеспечивает получение отливок без видимой пористости; снижение среднего размера зерна α -Al на 36%; повышение значений твердости на 1–6,7% в зависимости от участка отливки; увеличение значений предела текучести на 29%, предела прочности – на 35% и максимальных деформаций до разрушения – на 83%.

Список источников

1. Хворинов Н.И. Кристаллизация и неоднородность слитка. М.: Металлургия, 1958. 392 с.
2. Оно А. Затвердевание металлов / пер. с англ. М.: Металлургия, 1980. 152 с.
3. Найдек В.Л., Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С., Таранов Е.Д. О механизме воздействия вибрации на кристаллизацию и структурообразование сплавов // Литейное производство. 2003. № 9. С. 13–15.
4. Морин С.В. Комплексное исследование вибрационного воздействия на кристаллизацию и свойства отливок из алюминиевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук. Новокузнецк: СибГИУ, 2005. 169 с.
5. Белов Н.А., Савченко С.В., Белов В.Д. Атлас микроструктур промышленных силуминов: Справ. М.: Изд. Дом МИСиС, 2009. 204 с.
6. Скрябин М.Л. Современные материалы для поршней двигателей внутреннего сгорания // Сборник научных трудов Международной конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение». 2016. № 12. С. 374–379.
7. Shaha S.K. et al. Effect of Cr, Ti, V, and Zr micro-additions on microstructure and mechanical properties of the Al-Si-Cu-Mg cast alloy // Metallurgical and Materials Transactions: A. 2016. № 47. P. 2396–2409. doi: 10.1007/s11661-016-3365-2
8. Зуев Л.Б., Зариковская Н.В., Федосова М.А. Макролокализация пластического течения в алюминии и соотношение Холла–Петча // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, № 9. С. 68–74.

References

1. Khvorinov, N.I. (1958) *Kristallizatsiya i neodnorodnost' slitka* [Crystallization and heterogeneity of the ingot]. Moscow: Metallurgiya.
2. Ono, A. (1980) *Zatverdevaniye metallov* [Solidification of metals]. Moscow: Metallurgiya.
3. Naydek, V.L., Eldarkhanov, A.S., Nuradinov, A.S. & Taranov, E.D. (2003) O mekhanizme vozdeystviya vibratsii na kristallizatsiyu i strukturoobrazovaniye splavov [On the mechanism of the effect of vibration on the crystallization and structure formation of alloys]. *Liteynoye proizvodstvo – Foundry*. 9. pp. 13–15.
4. Morin, S.V. (2005) *Kompleksnoye issledovaniye vibratsionnogo vozdeystviya na kristallizatsiyu i svoystva otlivok iz alyuminiyevykh splavov* [Comprehensive study of vibration effects on crystallization and properties of castings from aluminum alloys]. Cand. Sc. Thesis. Novokuznetsk: SibGIU.
5. Belov, N.A. Savchenko, S.V. & Belov, V.D. (2009) *Atlas mikrostruktur promyshlennykh siluminov* [Atlas of microstructures of industrial silumins]. Moscow: Publ. House of MISiS.
6. Skryabin, M.L. (2016) *Sovremennyye materialy dlya porshney dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Modern materials for pistons of internal combustion engines]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy konferentsii "Nauka – Tekhnologiya – Resursosberezheniye"* – Collection of scientific papers of the International Conference "Science – Technology – Resource Saving". 12. pp. 374–379.
7. Shaha, S.K. et al. (2016) Effect of Cr, Ti, V, and Zr micro-additions on microstructure and mechanical properties of the Al-Si-Cu-Mg cast alloy. *Metallurgical and Materials Transactions: A*. 47. pp. 2396–2409. doi: 10.1007/s11661-016-3365-2

8. Zuev, L.B., Zarikovskaya, N.V. & Fedosova, M.A. (2010) Makrolokalizatsiya plasticheskogo techeniya v alyuminii i sootnosheniye Kholla-Petcha [Macrolocalization of plastic flow in aluminum and the Hall-Petch relation]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*. 80(9). pp. 68–74.

Информация об авторах:

Кахидзе Николай Иверьевич – младший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kakhidze.n@yandex.ru

Мубаракوف Рауль Габиденович – инженер-исследователь лаборатории нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: raul.mub@mail.ru

Синкина Ирина Леонидовна – студентка физико-технического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: sinkinairinal927@gmail.com

Жуков Илья Александрович – доктор технических наук, заведующий лабораторией нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: gofra930@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kakhidze Nikolay I., junior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kakhidze.n@yandex.ru

Mubarakov Raul G., research engineer, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: raul.mub@mail.ru

Sinkina Irina L., student, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sinkinairinal927@gmail.com

Zhukov Ilya A., Dr. Sc. (Engineering), head of laboratory, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: gofra930@gmail.com

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 8.11.2023; одобрена после рецензирования 28.11.2023; принята к публикации 12.12.2023

The article was submitted 8.11.2023; approved after reviewing 28.11.2023; accepted for publication 12.12.2023