



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-28-35>  
УДК 669.715, 621.9.048.6

Поступила 07.07.2023  
Received 07.07.2023

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

С. Л. РОВИН, А. О. ДИКУН, Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: foundry@bntu.by

*В статье представлены методика и результаты исследования влияния ультразвуковой обработки расплава деформируемых алюминиевых сплавов в процессе кристаллизации на структуру и свойства формирующихся слитков: зависимость балла зерна, пористости, размеров и распределения включений интерметаллидов от амплитуды ультразвукового излучения и частоты колебаний, а также расстояния до волновода. Кроме того, приведены данные анализа трансформации железосодержащих фаз ( $\alpha$ -AlFeSi и  $\beta$ -AlFeSi) под действием ультразвука и растворения титановых волноводов в процессе ультразвуковой обработки алюминиевого расплава.*

**Ключевые слова.** Алюминиевые сплавы, ультразвуковая обработка, полунепрерывное литье, кристаллизация, слиток, балл зерна, фрагментация, трансформация.

**Для цитирования.** Ровин, С. Л. Исследование влияния ультразвуковой обработки в процессе кристаллизации на структуру и свойства деформируемых алюминиевых сплавов / С. Л. Ровин, А. О. Дикун // *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-28-35>.

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT DURING CRYSTALLIZATION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF DEFORMABLE ALUMINUM ALLOYS

S. L. ROVIN, A. O. DIKUN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.  
E-mail: foundry@bntu.by

*The article presents the methodology and results of the study of the effect of ultrasonic treatment of the melt of deformable aluminum alloys during crystallization on the structure and properties of the formed ingots: the dependence of the grain score, porosity, size and distribution of inclusions of intermetallides on the amplitude of ultrasound radiation and the frequency of vibrations, as well as the distance to the waveguide. In addition, data on the analysis of the transformation of iron-containing phases ( $\alpha$ -AlFeSi and  $\beta$ -AlFeSi) under the action of ultrasound and dissolution of titanium waveguides during ultrasonic treatment of aluminum melt are presented.*

**Keywords.** Aluminum alloys, ultrasonic processing, semi-continuous casting, crystallization, ingot, grain ball, fragmentation, transformation.

**For citation.** Rovin S. L., Dikun A. O. Investigation of the effect of ultrasonic treatment during crystallization on the structure and properties of deformable aluminum alloys. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 3, pp. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-28-35>.

### Введение

Борьба за качество получаемых литых изделий и заготовок является наиболее важной и первостепенной задачей в литейном и металлургическом производствах. Важнейшими операциями на стадии подготовки жидкого металла, во многом определяющими структуру и свойства будущего изделия, являются рафинирование, модифицирование и дегазация расплава. Это в полной мере относится и к получению литых и деформируемых изделий из алюминиевых сплавов. Помимо традиционных способов обработки алюминиевых сплавов рафинирующими флюсами, дегазирующими и модифицирующими добавками, существует ряд физических методов воздействия на расплав, позволяющих заменить, дополнить или интенсифицировать эти процессы: механическое и магнитодинамическое перемешивание расплава, фильтрация сплава, продувка инертными газами, вакуумирование, воздействие на расплав магнитными полями, вибрацией и ультразвуком [1]. При этом многие исследователи считают ультразвуковую обработку

наиболее эффективным средством воздействия на структуру и соответственно свойства получаемой отливки особенно если это воздействие осуществляется на стадии кристаллизации сплава [1–3].

Однако большинство исследований в этой области посвящено обработке наиболее распространенных литейных сплавов – силуминов или специальных алюминиево-медных сплавов, так называемой 2000-й серии, а в последнее время – алюминий-литиевых сплавов, получивших широкое применение в аэрокосмической промышленности [4–6]. В то же время сведений об обработке ультразвуком деформируемых сплавов системы Al-Mg-Si (6000-й серии), широко используемых для изготовления труб, прутков, профилей для несущих и декоративных конструкций, изделий, обладающих достаточно высокой прочностью и коррозионной стойкостью, в литературе практически нет.

Задачей настоящих исследований, инициированных компанией «Алютех» – одного из ведущих производителей алюминиевых профильных систем в СНГ и Восточной Европе, было изучение влияния ультразвуковой обработки на сплавы 6000-й серии, в первую очередь, сплавы AW-6060, AW-6063, AW-6005A и их аналоги. Химический состав указанных сплавов в соответствии с EN 573–3–2009 приведен в табл. 1.

Таблица 1. Состав исследованных сплавов и их аналогов

Сплав	Стандарт	Массовая доля элементов сплава, %								
		Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Ti	Zn	прочие элементы в сумме
AW-6060	EN-573-3-2009	0,30–0,60	0,10–0,30	< 0,10	0,35–0,60	< 0,10	< 0,05	< 0,10	< 0,15	< 0,15
AW-6063		0,20–0,60	< 0,35	< 0,10	0,45–0,90	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,15	< 0,15
AW-6005A		0,50–0,90	< 0,35	< 0,30	0,40–0,70	< 0,50	< 0,30	< 0,10	< 0,20	< 0,15
АДЗ1	ГОСТ 4784-97	0,20–0,60	< 0,50	< 0,10	0,45–0,9	< 0,10	< 0,10	< 0,15	< 0,20	< 0,15

### Методика проведения лабораторных исследований

Для исследования влияния ультразвукового воздействия на расплав была разработана и изготовлена специальная лабораторная установка, схема и общий вид которой представлены на рис. 1.

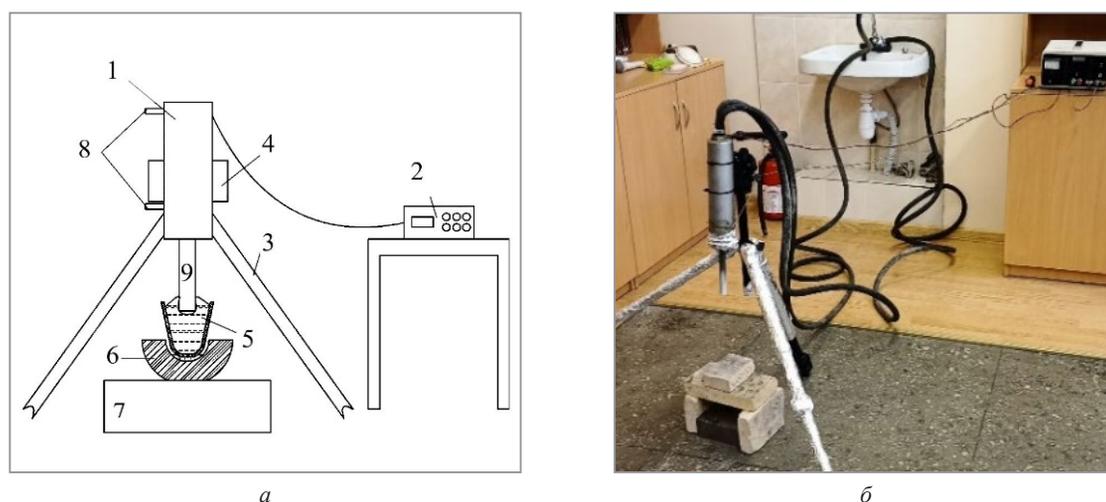


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) лабораторной установки для исследования влияния ультразвука на структуру и свойства сплавов: 1 – магнитоотриктор в водоохлаждаемом корпусе; 2 – универсальный ультразвуковой генератор; 3 – штатив; 4 – держатель; 5 – тигель с расплавом; 6 – чаша с кварцевым песком; 7 – огнеупорный кирпич; 8 – патрубки подвода/отвода охлаждающей воды; 9 – волновод

Шамотный тигель 5 с расплавом устанавливается в чашу 6, наполненную кварцевым песком, что обеспечивает устойчивость тигля во время обработки, снижает вероятность его опрокидывания и предотвращает пролив расплава в случае разрушения тигля. После установки тигля держатель 4 вместе с преобразователем ультразвуковых колебаний 1 опускается вниз до соответствующей отметки на штативе 3, отметка позволяет контролировать погружение волновода 9 в расплав на заданную глубину ~1 см. Перед погружением в расплав волновод прогревали газовой горелкой до ~ 300 °С, что снижало эффект захлаживания расплава и позволяло увеличить время обработки. После погружения волновода в расплав включали генератор ультразвуковых колебаний 2 и начинали обработку расплава, которая продолжалась

до момента затвердевания расплава в тигле. На протяжении всей обработки магнитостриктор через патрубки 8 охлаждали проточной водой с температурой  $\sim 18^\circ\text{C}$  [7].

Для определения амплитуды ультразвуковых колебаний использовали вибромметр БМ1-1, принцип действия которого основан на регистрации изменений электрической емкости воздушного зазора, образованного неподвижным электродом датчика и поверхностью, амплитуду колебаний которой нужно измерить. Для уменьшения погрешности измерений, обусловленной температурной и временной нестабильностью параметров измерительной схемы, в приборе предусмотрена возможность балансировки.

Температуру расплава в тигле контролировали пирометром СЕМ DT-8839. Время обработки расплава контролировали с помощью секундомера.

Для приготовления расплава использовали шамотные тигли емкостью  $75\text{ см}^3$  (в тигле помещалось около 180 г алюминиевого расплава). В качестве волноводов использовали титановые прутки диаметром 16 мм из сплава ВТ18. Для повышения стойкости тигля и уменьшения растворимости волновода в алюминиевом расплаве волновод и тигель перед использованием покрывали нитридом бора.

Плавку металла проводили в муфельной печи типа СНОЛ с регулируемым температурным режимом, одновременно в печь устанавливали шесть тиглей. Для взвешивания образцов использовали одночашечные аналитические лабораторные весы ВЛКТ-500 [7].

### Результаты исследований

В соответствии с представленной выше методикой в общей сложности было обработано 24 тигля с расплавом АW-6060. Расплавы подвергали ультразвуковому воздействию различной мощности излучения, с разными частотами и амплитудами. Полученные образцы исследовали на однородность структуры, средний размер зерна (балл зерна), количество, размеры и распределение включений (интерметаллидов) и их трансформацию. Полученные результаты сравнивали между собой и с характеристиками необработанных образцов. Изготовление шлифов из полученных образцов, определение балла зерна и исследование их структуры осуществляли с привлечением специалистов и использованием аналитического оборудования (цифрового микроскопа Zeiss Axio Vert и спектрометра OBLF GS 1000-II) СООО «Алюмин-Техно».

На рис. 2 представлены микрошлифы необработанного образца (рис. 2, а) и образцов, которые в процессе кристаллизации подвергали воздействию ультразвукового излучения с амплитудой 7, 15,4 и 22 мкм (рис. 2, б–г). Для подсчета количества зерен на единице площади шлифа и их средних размеров подготовленные образцы анодировали с помощью прибора для электролитического травления. Для анодирования использовали реактив Баркера (2%-ный раствор тетрафторборной кислоты  $\text{HBF}_4$ ). Анализ проводили на панорамных изображениях при 100-кратном увеличении.

Усредненные значения балла зерна в контрольных образцах и образцах, обработанных ультразвуком при различных режимах излучения, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Изменение балла зерна при различных режимах ультразвуковой обработки

Частота, Гц	Напряжение, В	Амплитуда, мкм	Балл зерна			Среднее значение
			образец 1	образец 2	образец 3	
без обработки			0,49	1,66	1,77	1,31
21000	0,7	9,2	1,44	2,66	2,38	2,16
	1,35	15,4	2,88	2,79	2,9	2,86
	2	21,6	2,53	2,73	2,65	2,64
	2,6	24,4	3,23	3,79	3,27	3,43
21400	0,7	7	2,04	1,68	1,78	1,83
	1,35	12,2	1,61	3,04	3,04	2,56
	2	18	2,18	3,1	2,84	2,71
	2,6	22	3,38	3,73	3,86	3,66

По данным таблицы был построен график зависимости балла зерна от амплитуды ультразвуковых колебаний (рис. 3).

Из рис. 2, 3 видно, что при повышении амплитуды ультразвуковых колебаний наблюдаются измельчение зерна и стабильный рост его балла. Причем в исследованном диапазоне ультразвукового излучения полученная зависимость балла зерна от амплитуды наиболее близка к экспоненциальной зависимости.

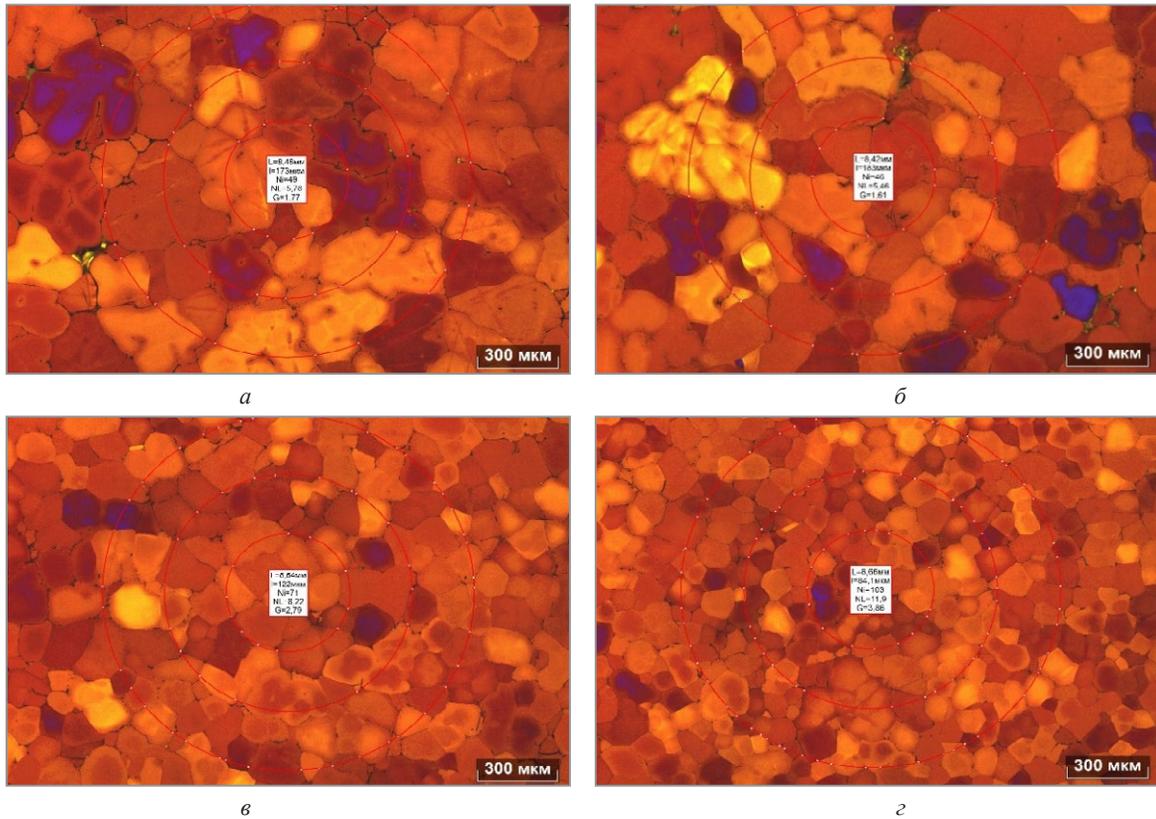


Рис. 2. Сравнение микрошлифов различных образцов:

*а* – образец без обработки ультразвуком; *б* – образец, обработанный ультразвуком с амплитудой 7 мкм; *в* – образец, обработанный ультразвуком с амплитудой 15,4 мкм; *г* – образец, обработанный ультразвуком с амплитудой 22 мкм

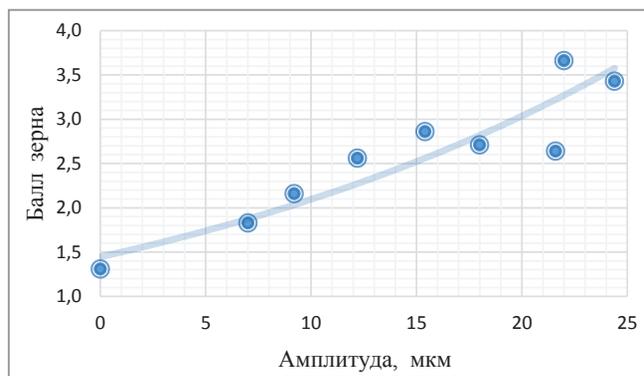


Рис. 3. Зависимость балла зерна от амплитуды ультразвуковых колебаний

Исследовали также изменение размера зерна по мере удаления от волновода. На рис. 4 показана схема расположения контрольных зон в сечении шлифа, в которых определяли балл зерна.

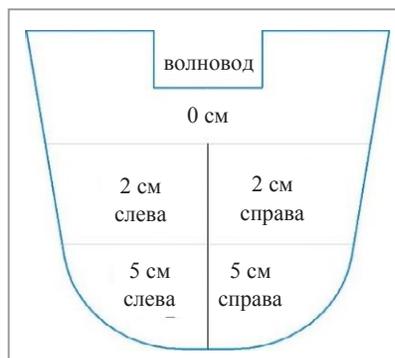


Рис. 4. Схема расположения контрольных зон металлографического исследования образцов

На рис. 5 приведены результаты анализа распределения балла зерна по сечению нескольких образцов в соответствии со схемой, представленной на рис. 4.

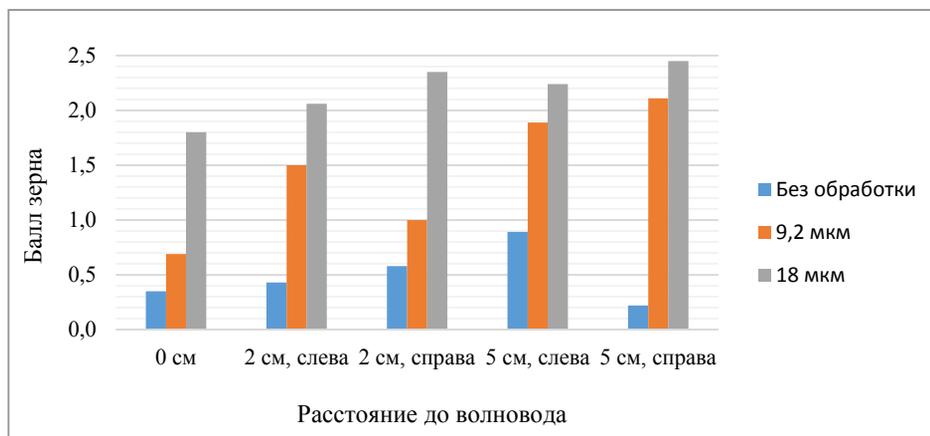


Рис. 5. Изменение балла зерна в зависимости от расстояния до волновода

Во всех контрольных зонах образцов, обработанных ультразвуком, балл зерна был выше, чем в аналогичных зонах необработанных образцов. Кроме того, заметно, что чем выше мощность излучения и его амплитуда, тем меньше зерно (выше его балл) в обработанном образце.

Из гистограммы на рис. 5 видно, что распределение балла зерна по объему исследуемых образцов неравномерно, причем для обработанных ультразвуком образцов выявлено возрастание балла зерна по мере удаления от источника в пределах экспериментального образца, а максимальный показатель балла зерна получен непосредственно у самого дна тигля. В целом увеличение балла зерна по мере удаления от источника излучения противоречит теории, согласно которой волна должна затухать в жидкой среде и соответственно эффект измельчения зерна должен угасать [4]. Однако в данном случае уменьшение размера зерна, по-видимому, может быть связано с переотражением волны (сложением волн) у дна тигля.

Для исследования влияния обработки ультразвуком на содержание в алюминиевом сплаве железосодержащих фаз  $\alpha$ -AlFeSi и  $\beta$ -AlFeSi, их фрагментацию (степень измельчения) и трансформацию (переход  $\alpha$ -фазы в наиболее опасную пластинчатую  $\beta$ -фазу) подготовленные образцы осветляли при помощи 0,5%-ного раствора плавиковой кислоты. Анализ проводили на панорамных изображениях при увеличении 500. Минимальный размер включений, подвергавшихся анализу, составлял 1 мкм. Характерные снимки, отражающие измельчение железосодержащих фаз в необработанном и обработанных ультразвуком образцах, представлены на рис. 6.

Сравнение обработанных образцов показало, что фрагментация включений  $\alpha$ -AlFeSi и  $\beta$ -AlFeSi практически линейно увеличивается (соответственно включения измельчаются) с повышением амплитуды ультразвуковых колебаний (рис. 7).

В то же время общее содержание железосодержащих фаз в обработанных и необработанных образцах, так же как и соотношение включений  $\alpha$ -AlFeSi и  $\beta$ -AlFeSi (степень трансформации), практически не отличаются и не зависят от режима обработки и параметров ультразвука. Результаты оценки степени трансформации фаз по объему – процентное содержание пластинчатой  $\beta$ -AlFeSi фазы (наиболее опасного с точки зрения последующего прессования заготовок включения) в общем объеме железосодержащих фаз приведены в табл. 3.

Существенное влияние оказывает ультразвуковая обработка и на пористость формирующейся литой заготовки, приводя к значительному измельчению пор. В табл. 4 приведены результаты измерения среднего линейного размера пор, образовавшихся при кристаллизации, а на рис.8 – зависимость размера пор от амплитуды ультразвуковых колебаний.

Зависимость размера пор от амплитуды ультразвуковых колебаний имеет вид, близкий к параболе: с ростом амплитуды пористость монотонно снижается и при амплитуде 18–20 мкм и более размеры пор в обработанных ультразвуком образцах в 6–10 раз меньше, чем в необработанных.

Чтобы определить, имело ли место растворение титанового волновода в алюминиевом расплаве в процессе ультразвуковой обработки, каждый третий образец подвергали контролю состава до и после обработки: никаких заметных изменений в химическом составе образцов выявлено не было.

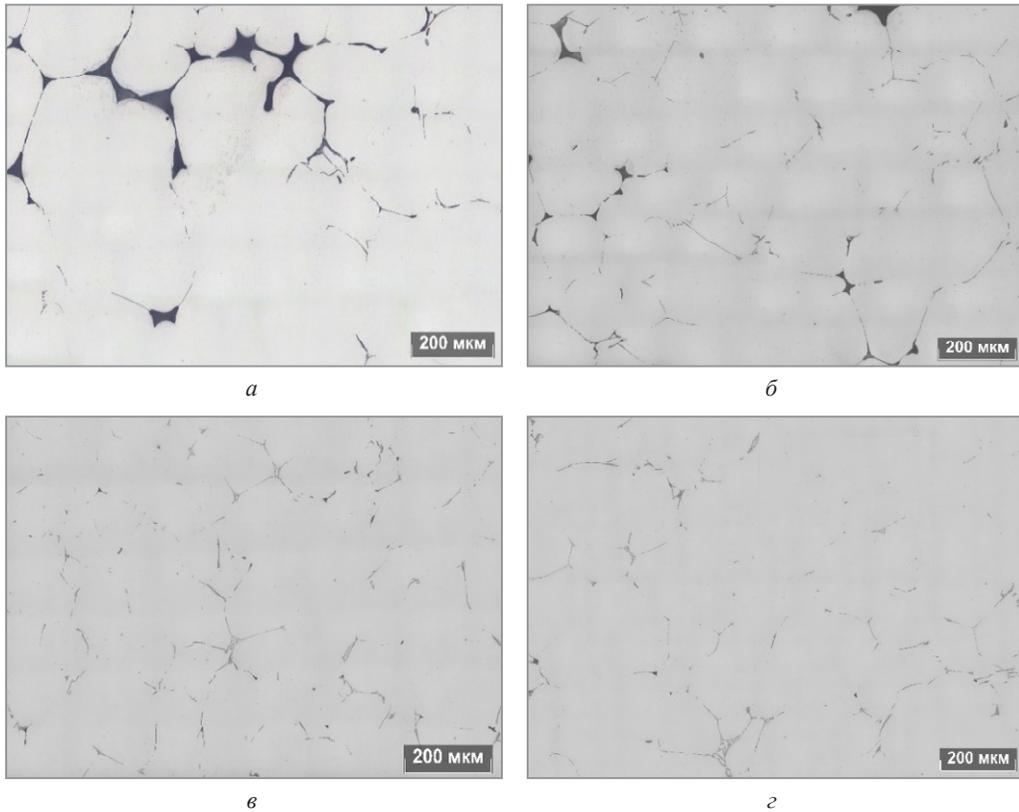


Рис. 6. Фрагментация железосодержащих фаз:

*а* – необработанный образец; *б* – образец, обработанный ультразвуком с амплитудой 7 мкм; *в* – образец, обработанный с амплитудой 15,4 мкм; *г* – образец, обработанный с амплитудой 22 мкм

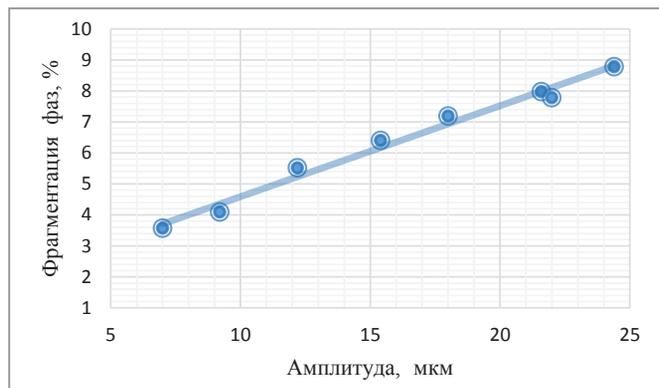


Рис. 7. Зависимость фрагментации железосодержащих фаз от амплитуды ультразвуковых колебаний

Таблица 3. Степень трансформации фаз (по объему)

Частота, Гц	Напряжение, В	Амплитуда, мкм	Степень трансформации железосодержащих фаз (по объему), %			Среднее значение
			образец 1	образец 2	образец 3	
без обработки			61,7	86,9	80,8	76,47
21000	0,7	9,2	90,2	53,7	90	77,97
	1,35	15,4	58,2	95,4	90,6	81,4
	2	21,6	58,1	78,3	96,9	77,77
	2,6	24,4	89,3	86	82,6	85,97
21400	0,7	7	87,7	92,5	91,1	90,43
	1,35	12,2	79,1	87,5	87,2	83,33
	2	18	90,2	89,7	83,4	87,77
	2,6	22	60,2	86,9	53,2	66,77

Таблица 4. Влияние обработки ультразвуком на размеры пор в алюминиевых слитках

Частота, Гц	Напряжение, В	Амплитуда, мкм	Средний линейный размер пор, мкм			Среднее значение по трем образцам
			образец 1	образец 2	образец 3	
без обработки			110	95	105	103,3
21000	0,7	9,2	50	65	40	51,7
	1,35	15,4	45	30	22	32,3
	2,0	21,6	55	15	20	30,0
	2,6	24,4	5	10	15	10,0
21400	0,7	7,0	48	50	35	44,3
	1,35	12,2	50	8	38	32,0
	2,0	18,0	20	16	15	17,0
	2,6	22,0	14	8	24	15,3

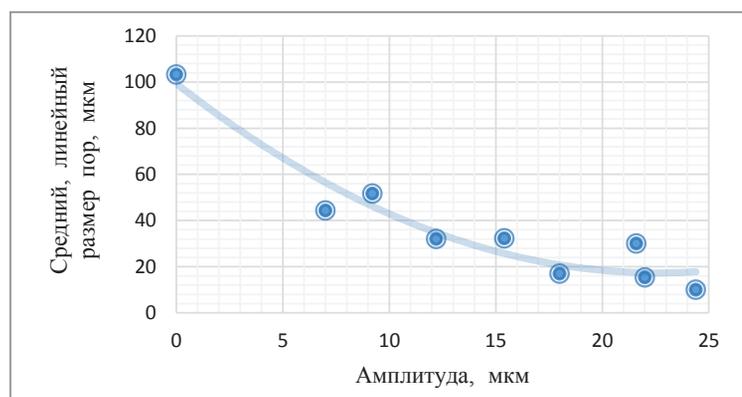


Рис. 8. Зависимость среднего линейного размера пор от амплитуды ультразвуковых колебаний

### Выводы

Результаты исследований подтвердили высокий потенциал ультразвуковой обработки с точки зрения улучшения структуры и свойств деформируемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si:

- обработка расплава ультразвуком в процессе кристаллизации приводит к существенному измельчению структуры формирующейся отливки – при амплитуде 22–24 мкм балл зерна в образцах увеличился более чем в 2,5 раза, что должно способствовать значительному повышению ее механических свойств;
- ультразвук вызывает значительное увеличение степени фрагментации содержащихся в сплаве включений, в том числе железосодержащих фаз, что должно способствовать повышению пластичности литой заготовки;
- обработка ультразвуком алюминиевого расплава в процессе кристаллизации практически не повлияла на общее содержание и степень трансформации железосодержащих фаз;
- ультразвуковое воздействие оказывает значительное влияние на пористость формирующейся литой заготовки – средний размер пор в исследованных образцах, обработанных при амплитудах 18–20 мкм и выше, оказался в 6–10 раз меньше, чем в образцах необработанных ультразвуком.

Таким образом, результаты проведенных исследований говорят о эффективности и перспективности использования ультразвуковой обработки при формировании литых заготовок из сплавов системы Al-Mg-Si, в частности сплавов типа AW-6060, AW-6063, AW-6005A, при необходимости повышения их механических свойств перед дальнейшей обработкой деформированием, в первую очередь прессованием (экструзией), прокаткой, волочением.

Вместе с тем полученные результаты выявили ряд вопросов, требующих проведения дополнительных исследований, в частности, необходимо определить оптимальные режимы ультразвуковой обработки для различных алюминиевых сплавов; исследовать глубину проникновения ультразвуковых колебаний в расплав и явления отражения ультразвуковой волны от стенок формы; исследовать и уточнить влияние происходящих структурных изменений на основные механические свойства (прочность и пластичность) деформируемых алюминиевых сплавов, в том числе после гомогенизирующего отжига.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Остерманн, Ф.** Технологии применения алюминия / Ф. Остерманн. М., 2019. 872 с.
2. **Золоторевский, В. С.** Metallovedenie litynykh alyuminievykh splavov / В. С. Золоторевский, Н. А. Белов. М.: МИСиС, 2005. 376 с.
3. **Михайловская, А. В.** Формирование гетерогенной структуры алюминиевых сплавов, обладающих повышенными скоростями сверхпластической деформации: автореф. дис. ...канд. техн. наук. М., 2008. 25 с.
4. **Эскин, Г. И.** Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия / Г. И. Эскин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgiya, 1988. 231 с.
5. **Xin-tao, Li.** Study of ultrasonic melt treatment on the quality of horizontal continuously cast Al-1% Si alloy / Li Xin-tao, Li Ting-ju, Li Xi-meng, Jin Jun-ze // *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006. Vol. 13. No. 1. P. 121–125.
6. **Puga, H.** Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> alloy / H. Puga [and others] // *Journal of Materials Processing Technology*, 2011. No. 211. P. 1729–1735.
7. **Дикун, А. О.** Влияние ультразвуковой обработки расплава в процессе кристаллизации на структуру деформируемых алюминиевых сплавов / А. О. Дикун, С. Л. Ровин, Е. В. Хрушев // *Современные технологии для заготовительного производства: сб. науч. работ 76-й РНТК проф.-преп. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов.* Минск, 20–21 апреля 2022 г. С. 119–121.

## REFERENCES

1. **Ostermann F.** *Tekhnologii primeneniya alyuminiya* [Aluminum application technologies]. Moscow, 2019, 872 p.
2. **Zolotarevskii V. S.** *Metallovedenie liteinykh alyuminievykh splavov* [Metal science of cast aluminum alloys]. Moscow, MISiS Publ., 2005, 376 p.
3. **Mikhailovskaya A. V.** *Formirovanie geterogennoi struktury alyuminievykh splavov, obladayushchikh povyshennymi skorostyami sverkhplasticheskoi deformatsii. Dis. kand. tekhn. nauk* [Formation of a heterogeneous structure of aluminum alloys with increased rates of superplastic deformation. Dis. ...cand. of techn. sciences]. Moscow, 2008, 25 p.
4. **Eskin G. I.** *Ul'trazvukovaya obrabotka rasplavlennogo alyuminiya* [Ultrasonic Processing of Molten Aluminum] Moscow, Metallurgiya Publ., 1988, 231 p.
5. **Xin-tao Li, Ting-ju Li, Xi-meng Li, Jun-ze Jin.** Study of ultrasonic melt treatment on the quality of horizontal continuously cast Al-1% Si alloy. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 121–125.
6. **Puga H.** Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, no. 211, pp. 1729–1735.
7. **Dikun A. O.** Vliyanie ul'trazvukovoi obrabotki rasplava v protsesse kristallizatsii na strukturu deformiruemykh alyuminievykh splavov [Influence of ultrasonic treatment of melt during crystallization on the structure of wrought aluminum alloys]. *Sovremennye tekhnologii dlya zagotovitel'nogo proizvodstva: sb. nauchn. rabot 76-i RNTK prof.-prep. sostava, nauch. rabotnikov, doktorantov i aspirantov = Modern technologies for procurement production.* Minsk, 2022. pp. 119–121.