

**Ворон М. М.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: mihail.voron@gmail.com

**Дрозд Е. А.**, мл. науч. сотр., e-mail: drozd.eo@gmail.com

**Берест Д. А.**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Si–Cu ПОСЛЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Рассмотрено влияние процесса кристаллизации в переменном магнитном поле на структуру и качество литейных алюминиевых сплавов системы Al–Si–Cu. Проведена оценка усадочных дефектов, изменения микроструктуры и механических свойств доэвтектического, эвтектического и заэвтектического силуминов АК5М2, АК12М2 и АК18М2, соответственно.*

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, силумины, методы физического воздействия на расплав, наложение электромагнитных полей при кристаллизации.

*Розглянуто вплив процесу кристалізації в змінному магнітному полі на структуру і якість ливарних алюмінієвих сплавів системи Al–Si–Cu. Проведено оцінку усадкових дефектів, зміни микроструктури та механічних властивостей доевтектичного, евтектичного і заевтектичного силуминів АК5М2, АК12М2 і АК18М2, відповідно.*

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, силуміни, методи фізичного впливу на розплав, накладення електромагнітних полів при кристалізації.

*The influence of crystallization process in an alternating magnetic field on the structure and quality of Al–Si–Cu cast aluminum alloys is considered. The estimation of shrinkage defects, changes in the microstructure and mechanical properties of the pre-eutectic, eutectic and hypereutectic alloys Al–5Si–2Cu, Al–12Si–2Cu and Al–18Si–2Cu, respectively, have been performed.*

**Key words:** aluminum alloys, silumins, methods of physical influence on the melt, application of electromagnetic fields during crystallization.

### Введение

Для литейных алюминиевых сплавов наиболее распространенными способами улучшения механических и эксплуатационных характеристик являются модифицирование, микролегирование и различные методы обработки расплава. Если первые способы требуют грамотного введения и обеспечения усвоения добавок, которые часто являются дорогостоящими, то другие методы обработки расплава не только не изменяют химический состав сплава, но также дают возможность широкого выбора того или иного метода, в зависимости от поставленных задач и получаемой продукции [1, 2].

Все большую популярность последние годы приобретают именно методы обработки расплава при помощи различных физических воздействий, среди которых наиболее популярными являются – вибрационная, кавитационная (ультразвуковая), высокоэнергетическая (плазма, лазер) и электромагнитная обработки [2–8].

На сегодняшний день одним из наиболее действенных и технологически оправданных может считаться обработка расплава магнитным полем. Недавний опыт многих специалистов [8–11] подтверждает, что влияние магнитного поля способствует измельчению структуры металла, гомогенизирует химический состав сплавов, повышает растворимость легирующих элементов. Конкретно для алюминиевых сплавов это воздействие выражается в измельчении дендритной структуры и интерметаллидных фаз, изменении количества эвтектики и повышении степени легированности твердого раствора.

Более широко применяется обработка расплава непосредственно перед заливкой, в то время как физическое воздействие на процесс кристаллизации исследовано мало. Предполагается, что изменение условий кристаллизации под действием физических методов воздействия может способствовать прохождению более неравновесных процессов, что непременно повлияет на состав, форму и распределение составляющих фаз, а вследствие – и на свойства литого металла.

Наиболее используемыми литейными алюминиевыми сплавами, в частности в автомобильной промышленности, являются силумины системы Al–Si–Cu. Особенности применения этих сплавов связаны со строгим следованием стандартам, поэтому модифицирование и микролегирование для них не всегда приветствуется [1, 12, 13]. В то же время, большинство способов обработки расплава способны положительным образом изменять структуру и свойства отливок.

### *Экспериментальная часть*

В данной работе проводилась электромагнитная обработка алюминиевых сплавов АК5М2, АК12М2 и АК18М2 во время кристаллизации. Выбранные сплавы являются доэвтектическим, эвтектическим и заэвтектическим, соответственно. Обработку проводили следующим способом: расплав, полученный в печи сопротивления, заливали в графитовую форму с цилиндрической полостью диаметром  $\varnothing 70$ , высотой  $h$  250 мм, помещенную внутри соленоида системы наложения электромагнитного поля; с момента заливки до момента кристаллизации металл подвергался воздействию переменного электромагнитного поля  $H \sim 0,1$  Тл. Температура расплава перед заливкой была на  $40 \pm 10$  °С выше положенной, что связано с несколькими задачами:

- увеличить время обработки металла;
- создать заведомо менее благоприятные условия литья;
- обеспечить условия для образования более тонкой зоны мелких равноосных зерен на границе форма/жидкий металл (в таком случае более наглядно была бы видна картина влияния обработки на макроструктуру слитка);
- во время кристаллизации в магнитном поле охлаждение металла в объеме слитка проходит в условиях постоянного выравнивания температурного поля, что ускоряет кристаллизацию и вызывает увеличение количества усадочных дефектов. С повышением температуры разливки ожидалось уменьшить этот негативный эффект.

Для достоверности изучения процесса обработки проводили сравнение с отливками этих же сплавов, отлитыми в ту же форму, но без наложения электромагнитного поля. Все экспериментальные отливки имели вес 2100–2250 г. Приготовление образцов заключалась в подготовке макрошлифа путем распиливания отливки по плоскости высоты цилиндра, что позволяло исследовать структуру от края к центру слитка. Далее следовала подготовка микрошлифов и стандартных пятикратных образцов для исследования механических свойств.

Макроструктура образцов показана на рис. 1.

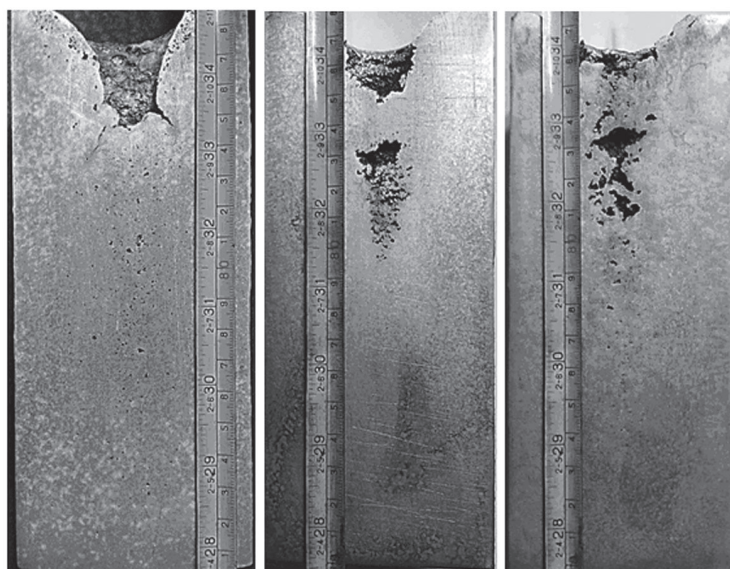
Из анализа макроструктурной картины можно сделать два основных вывода: наложение электромагнитного поля во время кристаллизации усиливает дефекты усадочного происхождения. После электромагнитной обработки значительно уменьшается либо исчезает зона столбчатых кристаллов, структура измельчается и становится более однородной.

Характер изменения микроструктуры исследовали при помощи электронной микроскопии шлифов, изготовленных из центральных частей слитков, в которых гарантированно реализовывалась электромагнитная обработка. Результаты анализа показаны на рис. 2.

Доэвтектический сплав АК5М2 в литом состоянии имеет крупные области неоднородного распределения эвтектики, а дендриты характеризуются большими размерами и неравномерной конфигурацией. Структура сплава после обработки



а



б

AK5M2

AK12M2

AK18M2

Рис. 1. Макроструктура исследуемых сплавов в литом состоянии (а) и после электромагнитной обработки во время кристаллизации (б)

становится в целом более однородной и мелкозернистой. Для сплава АК12М2 в литом состоянии характерны области неравномерного распределения эвтектики, крупных фаз, в особенности кремния, и ликвадий. Обработанный сплав имеет более дисперсную структуру и равномерное распределение структурных составляющих, особенно – кристаллов кремния. Заэвтектический сплав АК18М2 имеет неравномерно распределенные крупные кристаллы превичного кремния и конгломераты железосодержащих фаз. В обработанном состоянии структура имеет существенно более равномерно распределенный кремний меньших размеров. Эта же тенденция наблюдается и для конгломератов железосодержащих фаз.

Очень во многом механические свойства силуминов зависят от технологических параметров плавки и литья, что в некоторых случаях может обеспечить им довольно



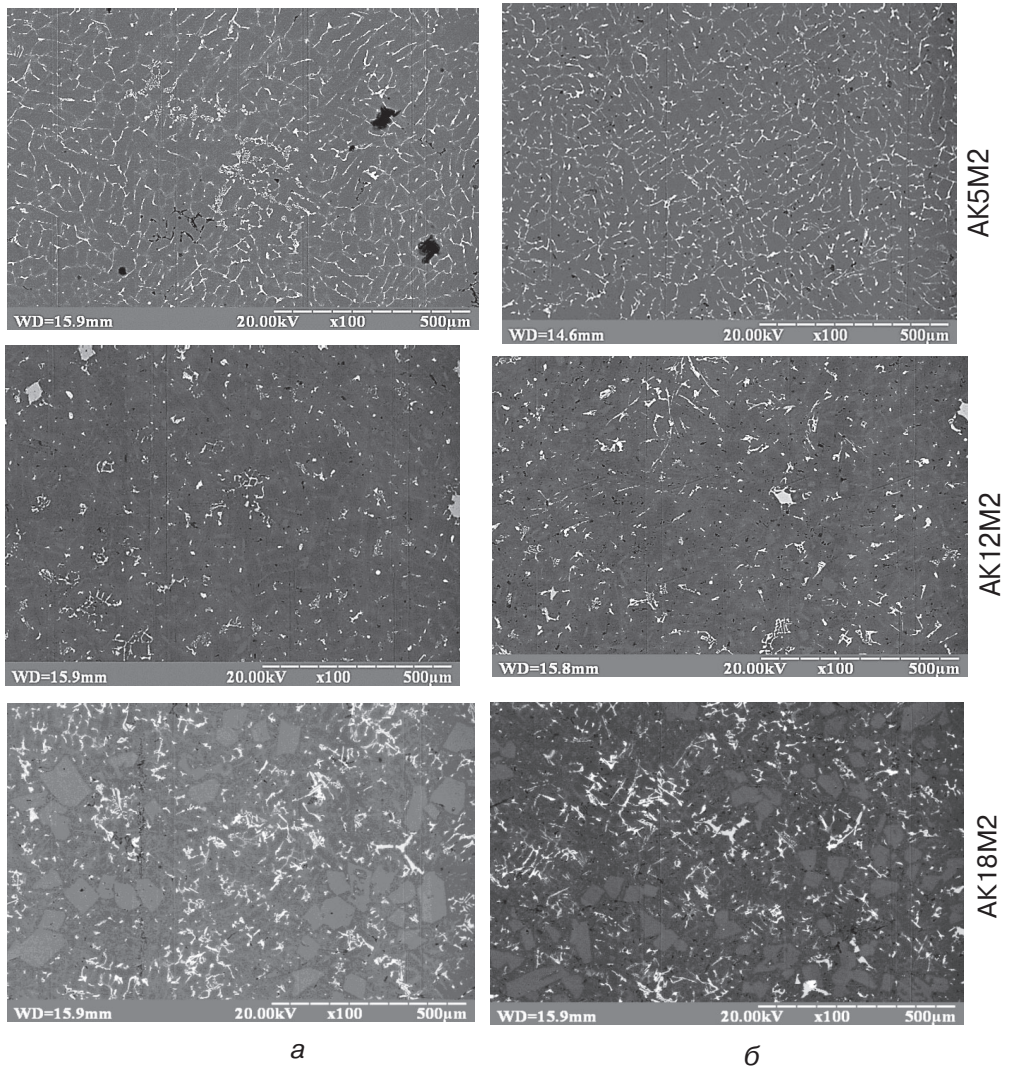


Рис. 2. Микроструктура исследуемых сплавов в литом состоянии (а) и после электромагнитной обработки во время кристаллизации (б)

высокие показатели прочности и для некоторых сплавов – пластичности. Условия, в которых проводились исследования, можно назвать неблагоприятными для получения

высоких механических свойств отливок, как было упомянуто ранее. Тем не менее, тенденция влияния наложения электромагнитных полей на металл во время кристаллизации прослеживалась. Механические свойства исследуемых образцов приведены в таблице.

**Сравнение механических свойств исследуемых сплавов**

**Выводы**

Обработка силуминов системы Al-Si-Cu электромагнитным полем во время кристаллизации оказывает положительное влияние на структуру и свойства металла отливки. Среди главных эффектов воздействия – из-

Сплав	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
AK5M2 (стандарт)	118–206	0,5–2
AK5M2 литой	84	–
AK5M2 обработанный	102	1
AK12M2 (стандарт)	186–260	1–1,5
AK12M2 литой	64	–
AK12M2 обработанный	108	0,5
AK18M2 (стандарт)	92–136	–
AK18M2 литой	71	–
AK18M2 обработанный	123	–

мельчение структурных составляющих с их более равномерным распределением и заметное повышение механических свойств. Недостатком обработки является то, что она не устраняет усадочные дефекты, а в некоторых случаях даже способствует их развитию. Решение этой проблемы может базироваться на оптимизации условий литья и обработки металла.



### Список литературы

1. *Алюминиевые сплавы.* – В кн.: *Авиация: Энциклопедия* / Гл. ред. Г. П. Свищев. – М.: Науч. изд-во «Большая рос. энцикл.» : Центр. аэрогидродинам. институт им. Н. Е. Жуковского, 1994. – 736 с.
2. *Ефимов В. А., Эльдарханов А. С.* Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. – М.: – *Металлургия*, 1995. – 272 с.
3. *Эскин Г. И.* Влияние кавитационной обработки расплава на структуру и свойства литых и деформированных легких сплавов // *Вестник российской академии естественных наук. Metallurgiya.* – 2010. – № 3. – С. 82–89.
4. *Котлярский Ф. М., Борисов А. Г., Цуркин В. Н.* и др. Термовременная обработка алюминиевых сплавов // *Процессы литья.* – 2012. – № 3. – С. 42–53.
5. *Мысик Р. К., Брусницын С. В., Груздева И. А.* Использование вибрационной обработки при производстве стальных оливок. // *Научные труды XIV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ.* – Екатеринбург, 2008. – № 41. – С. 30–33.
6. *Лобода П. І., Богомол Ю. І., Соловйова Т. О.* Вплив ультразвуку на структуру і властивості спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів // *Металознавство та обробка металів.* – 2012. – № 4. – С. 23–28.
7. *Волков Г. В.* Обработка расплава внешними физическими полями как инструмент воздействия на элементы различных структурных уровней. // *Литейное производство на рубеже столетий: тезисы докладов 2-6 июня 2003 г., ФТИМС.* – К.: *Процессы литья, МП «Информлитъ»*, 2003. – С. 41–42.
8. *Дубоделов В. И., Середенко В. А., Фикссен В. Н.* Электромагнитное и электрогидроимпульсное воздействие на расплав многокомпонентного алюминиевого сплава. // *Литейное производство на рубеже столетий: Тезисы докладов 2-6 июня 2003 г., ФТИМС.* – К.: *Процессы литья, МП «Информлитъ»*, 2003. – С. 23–26.
9. *Гладков А. С.* Разработка формы для получения трубных заготовок из тугоплавких металлов с наложением электромагнитных полей при кристаллизации расплава // *Литейное производство: Высококачественные отливки на основе эффективных технологий. Тезисы докладов 2-4 июня 2004 г. ФТИМС НАН Украины.* – К.: *Процессы литья*, 2004. – С. 80–81.
10. *Дубоделов В. И., Середенко В. А., Косинская А. В., Хоружий В. Я.* Структура и свойства алюминиевого сплава эвтектического состава, закристаллизованного в постоянном магнитном поле // *Процессы литья.* – 2010. – № 4. – С. 14–20.
11. *Скоробагатько Ю. П.* Фізичне модифікування заевтектичних алюмінієвих сплавів з використанням електромагнітної дії // *Металознавство та обробка металів.* – 2011. – № 4. – С. 44–49.
12. *Бялік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. Н., Москаленко Ю. Н.* *Металознавство: Підручник.* – К.: *ІВЦ «Політехніка»*, 2001. – 375 с.
13. *Стеценко В. Ю.* Модифицирование вторичных сплавов // *Литье и металлургия.* – 2015. – № 3. – С. 54–56.



### References

1. *Svishhev, G. P.* (1994). *Aljuminievye splavy.* - V kn.: *Aviacija: Jenciklopedija.* Moscow: Nauch. izd-vo «Bol'shaja ros. jencikl.» : Centr. ajerogidrodinam. institut im. N. E. Zhukovskogo [in Russian].
2. *Efimov, V.A. & Jel'darhanov, A.S.* (1995). *Fizicheskie metody vozdejstvija na procesy zatverdvanija splavov.* Moscow: – *Metallurgija* [in Russian].

3. Eskin, G. I. (2010). Vliyanie kavitacionnoj obrabotki rasplava na strukturu i svoystva lityh i deformirovannyh legkih spлавov [*Influence of cavitation treatment of a melt on the structure and properties of cast and deformed light alloys*]. Vestnik rossijskoj akademii estestvennyh nauk. Metallurgija – Newsletter Russian Academy of Natural Sciences. Metallurgy, no. 3, pp. 82–89. [in Russian].
4. Kotljarskij, F. M., Borisov, A. G., & Curkin, V. N. (2012). Termovremennaja obrabotka aluminievyyh spлавov [*Thermal treatment of aluminum alloys*]. : Processy lit'ja, no. 3, pp. 42–53. [in Ukrainian].
5. Mysik R. K., Brusnicyn, S. V., & Gruzdeva, I. A. (2008). Ispol'zovanie vibracionnoj obrabotki pri proizvodstve stal'nih olivok [*Use of vibration treatment in the production of steel olives*]. Nauchnye trudy XIV otchetnoj konferencii molodyh uchenyh GOU VPO UGTU-UPI, Vol. 41, pp. 30–33. [in Russian].
6. Loboda, P. I., Bogomol, Ju.I., & Solovjova, T.O. (2012). Vpliv ul'trazvuku na strukturu i vlastivosti sprjamovano zakristalizovanih evtektichnih spлавiv [*The influence of ultrasound on the structure and properties of directed crystallized eutectic alloys*]. Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, no. 4, pp. 23–28 [in Ukrainian].
7. Volkov, G. V. (2003). Obrabotka rasplava vneshnimi fizicheskimi poljami kak instrument vozdeystvija na jelementy razlichnyh strukturnyh urovnej [*Processing of melt by external physical fields as an instrument of influence on elements of different structural levels*]. Litejnoe proizvodstvo na rubezhe stoletij. Kyiv: Processy lit'ja, pp.41–42. [in Ukrainian].
8. Dubodelov, V. I., Seredenko, V. A., & Fikssen, V. N. (2003). Elektromagnitnoe i Elektrogidroimpul'snoe vozdeystvie na rasplav mnogokomponentnogo aluminievogo splava [*Electromagnetic and electrohydropulse effects on the melt of a multicomponent aluminum alloy*]. Litejnoe proizvodstvo na rubezhe stoletij. Kyiv: Processy lit'ja, pp.23–26. [in Ukrainian].
9. Gladkov, A. S. (2004). Razrabotka formy dlja poluchenija trubnyh zagotovok iz tugoplavkih metallov s nalozheniem jelektromagnitnyh polej pri kristallizacii rasplava [*Development of a mold for obtaining tube billets from refractory metals with the application of electromagnetic fields during crystallization of the melt*]. Litejnoe proizvodstvo: Vysokokachestvennye otlivki na osnove jefektivnyh tehnologij. Kyiv: Processy lit'ja, pp. 80–81. [in Ukrainian].
10. Dubodelov, V. I., Seredenko, V. A., Kosinskaja, A. V., & Horuzhij, V. Ja. (2010). Struktura i svoystva aluminievogo splava jevtekticheskogo sostava, zakristalizovannogo v postojannom magnitnom pole [*Structure and properties of an aluminum alloy of a eutectic composition crystallized in a constant magnetic field*]. Processy lit'ja, no. 4, pp. 14–20 [in Ukrainian].
11. Skorobagat'ko, Ju.P. (2011). Fizichne modifikuvannja zaevtektichnih aluminievih spлавiv z vikoristannjam elektromagnitnoї diї [*Physical modification of zeoutectic aluminum alloys using electromagnetic action*]. Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, no. 4, pp. 44–49 [in Ukrainian].
12. Bjalik, O.M., Chernenko, V.S., Pisarenko, V.N., & Moskalenko, Ju.N. (2001). Metaloznavstvo [*Product innovative policy*]. Kyiv: IVC «Politehnika» [in Ukrainian].
13. Stecenko, V.Ju. (2015). Modificirovanie vtorignyh spлавov [*Modification of secondary alloys*]. Lit'e i metallurgija, no. 3, pp. 54–56 [in Belarus].

Поступила 15.01.2018