

УДК 533.9:532.516:662.2/.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, РАЗЛИТОГО В ФОРМУ С ПОМОЩЬЮ ДИСКОВОГО МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО НАСОСА

С. С. Кацнельсон, Г. А. Поздняков, А. Н. Черепанов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
E-mails: saveli@itam.nsc.ru, georg@itam.nsc.ru, ancher@itam.nsc.ru

Исследовано влияние на свойства модифицированного алюминиевого сплава двух различных по составу наномодификаторов при их гомогенизации в объеме расплава алюминия марки АЛ7 и заливке в форму. Для проведения экспериментов использовался центробежный кондукционный магнитогидродинамический насос. Заливка осуществлялась в графитовую форму с тремя цилиндрическими каналами диаметром 38 мм и длиной 160 мм, рассчитанными на массу металла, равную 500 г. В качестве модифицирующих добавок использовались две композиции: наноразмерные частицы порошка нитрида алюминия размером $40 \div 100$ нм или металлизированные углеродные нанотрубки размером менее 25 нм, плакированные алюминием с целью улучшения смачиваемости их поверхности. Анализ структуры экспериментальных и контрольного образцов показал, что применение модифицирующих добавок приводит к измельчению зеренной структуры литого металла. Согласно теории Холла — Петча это может способствовать улучшению механических характеристик литого металла.

Ключевые слова: расплав металла, магнитогидродинамический насос, наномодификаторы, структура литых сплавов.

DOI: 10.15372/PMTF20150516

Использование магнитогидродинамических (МГД) насосов в литейном производстве позволяет создать закрытый цикл, включающий плавление металлов, транспортировку, обработку (дегазация, внесение присадок, в том числе нанодисперсных модификаторов (НМ)) и разливку расплава. Следует отметить, что применение такого цикла существенно улучшает экологию производства и минимизирует степень загрязнения расплава в процессе его транспортировки. Ввод легирующих присадок и НМ непосредственно в поток, их интенсивное перемешивание и литье под регулируемым давлением позволяют получать изделия практически любой сложности и высокого качества. Основными проблемами являются разработка и создание МГД-насосов, работающих с высокотемпературными расплавами. В настоящее время имеются установки, работающие с легкоплавкими и цветными металлами [1–4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-08-00814).

© Кацнельсон С. С., Поздняков Г. А., Черепанов А. Н., 2015

В данной работе представлены результаты первых экспериментов по разливке расплава алюминия марки АЛ7, содержащего наноразмерные модифицирующие порошки, с помощью специально разработанного центробежного кондукционного МГД-насоса [5, 6]. Сплавы системы алюминий — кремний (силумины) служат основой большинства литейных алюминиевых композиций, широко применяемых в качестве конструкционных материалов для фасонного литья в автотракторном и авиастроении, строительстве, автомобилестроении и других отраслях промышленности. Вследствие структурных особенностей литых сплавов — наличия грубых хрупких включений кремния и интерметаллических фаз — прочностные характеристики силуминов, особенно пластичность, невысокие. Для улучшения структуры и механических свойств литейных промышленных сплавов алюминия регулируются режимы плавки и литья, условия кристаллизации отливок (литье в песчаные и металлические формы, под давлением и т. д.). Однако наиболее эффективным способом улучшения механических свойств силуминов остается модифицирование, т. е. измельчение элементов структуры за счет введения в расплав перед его заливкой небольшого количества модифицирующих элементов.

Известен способ модификации силуминов за счет добавления фтористого натрия, металлического натрия или его соединений, позволяющий измельчать элементы структуры эвтектического кремния в этих сплавах [7–9]. Однако данный способ не получил широкого распространения по экологическим и технологическим причинам. Одним из главных недостатков является ограниченное время сохранения требуемой концентрации модификатора в расплаве после его внесения (обычно менее 30 мин), что обусловлено испарением и окислением легкоплавкого натрия. Последнее обстоятельство особенно неблагоприятно для серийного и массового производства литья из раздаточных печей, в которых расплав, обработанный содержащими натрий флюсами, имеет полностью модифицированную структуру лишь в начальный период разливки.

Наилучшие результаты были получены при использовании микродобавок стронция, который подобно натрию вызывает измельчение алюминиево-кремниевой эвтектики и в то же время обеспечивает сохранение свойств модифицированного расплава при длительном его выстаивании (до 6 ч) и многократном переплаве модифицированного сплава (3–4 раза) [10].

Исследована возможность применения стронция в промышленности в качестве модификатора алюминиево-кремниевых сплавов. В результате установлены существенные ограничения на его применение. Введение стронция затруднено вследствие его самовозгорания, токсичности паров, необходимости повышения температуры расплава, что увеличивает его газопоглощение. Кроме того, высокая стоимость чистого стронция и небольшой объем его добычи также ограничивают область применения этого металла.

В последнее десятилетие широкое применение в качестве модификаторов литейных сплавов получают специально подготовленные нанодисперсные порошки химических соединений, которые выполняют роль дополнительных центров кристаллизации при первичной кристаллизации. Модифицирующие нанопорошки используются для улучшения качества алюминиевых сплавов и отливок [11–15]. Установлено, что эффективность применения таких порошков зависит от смачиваемости поверхности частиц, их химического состава и гомогенности распределения в объеме расплава.

В данной работе исследовано влияние двух различных по составу НМ при их гомогенизации в объеме расплава и заливке в форму с помощью МГД-насоса. Для этого была изготовлена графитовая форма с тремя цилиндрическими каналами диаметром 38 мм и длиной 160 мм, рассчитанными на массу металла, равную 500 г. В качестве модифицирующих добавок использовались две композиции:

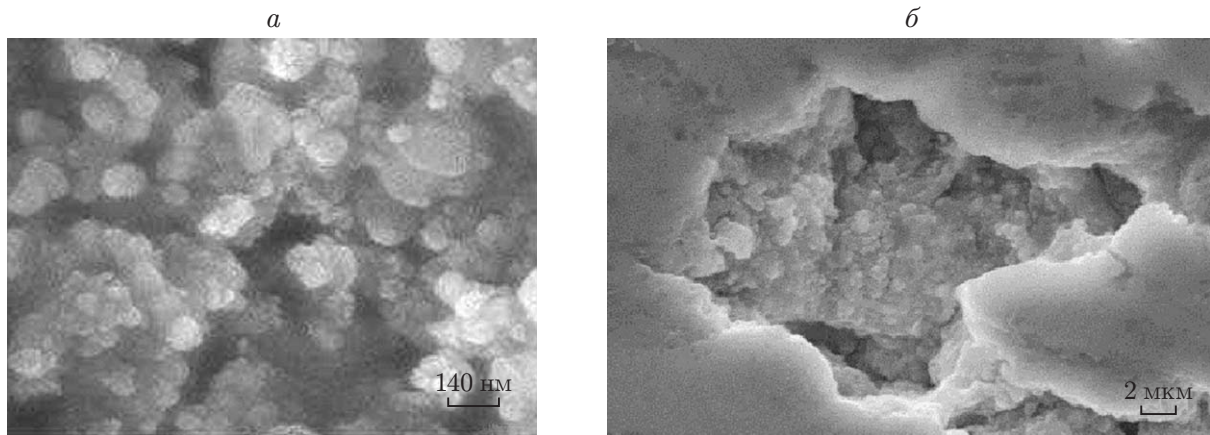


Рис. 1. Нанопорошки AlN (а) и МУНТ (б) в алюминиевой матрице

- 1) наноразмерные частицы порошка нитрида алюминия (AlN) размером $40 \div 100$ нм, плакированные алюминием в соотношении 1 : 3;
- 2) металлизированные углеродные нанотрубки (МУНТ) размером менее 25 нм, плакированные алюминием в соотношении 1 : 19.

С целью недопущения значительного изменения химического состава исходного сплава аналогично [11–13] в качестве плакирующего вещества был выбран алюминий. Плакирование порошков осуществлялось в центробежной планетарной мельнице. На рис. 1 показаны морфология и размер агрегированных частиц порошка нитрида алюминия и металлизированных углеродных трубок (в алюминиевой матрице).

Модифицирующая добавка на основе AlN упаковывалась в алюминиевую фольгу в виде брикета, добавка на основе МУНТ прессовалась в нейтральной атмосфере и принимала форму таблетки, после чего нагревалась до температуры, близкой к температуре плавления алюминия, а затем экструдировалась через фильеру в виде наноструктурированной композитной проволоки диаметром 12 мм.

Массовая доля C наномодификатора 1 составляла 0,04 %, в расчете на AlN, а наномодификатора 2 — 0,012 % в расчете на МУНТ. В качестве исследуемого материала использовался сплав марки АЛ7, имеющий следующий химический состав: $C_{Fe} = 1,25$ %, $C_{Si} = 6,56$ %, $C_{Mn} = 0,5$ %, $C_{Ni} = 0,25$ %, $C_{Cu} = 1,4$ %, $C_{Mg} = 0,3$ %, $C_{Zn} = 0,4$ %, $C_{Al} = 89,34$ %.

Из сплава марки АЛ7 были изготовлены три шихтовые заготовки, каждая из которых имела массу 500 г. Заготовка помещалась в стальной ковш и плавилась в нагревательной печи с перегревом до 700 °С. Затем в ковш погружался модификатор, после чего расплав заливался в рабочую полость кондукционного МГД-насоса, предварительно нагретую до температуры 500 °С. После включения электромагнитного поля осуществлялись перемешивание расплава и подача его в виде струи в графитовую форму. На рис. 2 показана форма струи металла, подаваемой МГД-насосом. Видно, что на расстоянии, приблизительно равном 150 мм, струя сохраняет устойчивую цилиндрическую форму, после чего развиваются неустойчивости, приводящие к ее разрушению.

Первая заливка осуществлялась без ввода в расплав модифицирующей добавки (заливка контрольного образца). Вторая и третья заливки содержали модификаторы 1 и 2 соответственно. Из полученных отливок вырезались образцы для подготовки шлифов.

Анализ структуры экспериментальных и контрольных образцов осуществлялся с помощью оптического микроскопа “Альтами” МЕТ 1М. На рис. 3 показана структура контрольного и экспериментальных образцов. Видно, что применение модифицирующих доба-

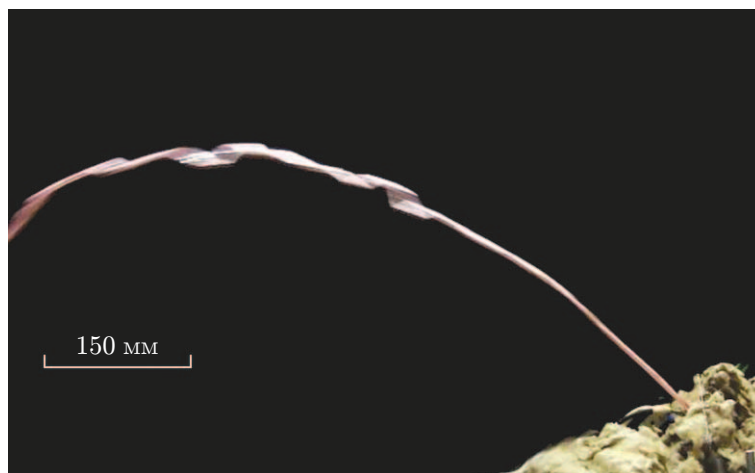


Рис. 2. Струя алюминиевого сплава на выходе из МГД-насоса в открытом пространстве

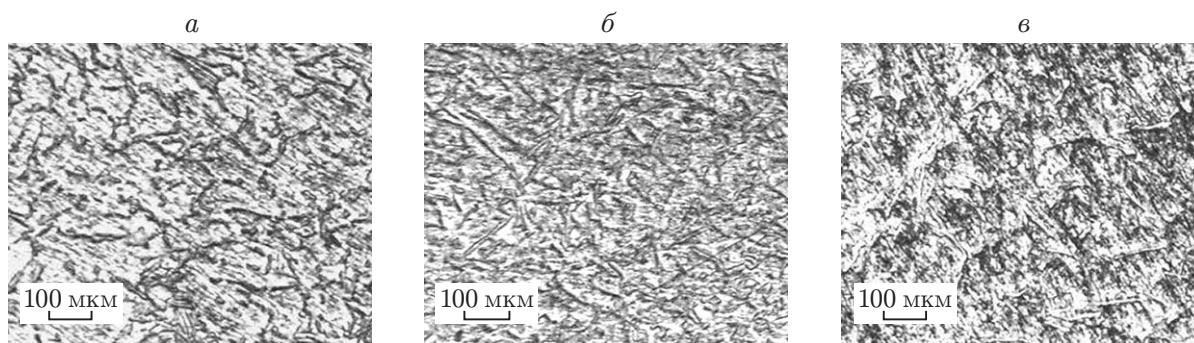


Рис. 3. Структура контрольного и экспериментальных образцов:
а — без НМ, *б* — с AlN, *в* — с МУНТ

вок приводит к измельчению зеренной структуры литого металла, количественные характеристики которого приведены в табл. 1. Из табл. 1 следует, что в результате применения в качестве наномодифицирующей добавки нитрида алюминия средняя площадь поверхности зерна S уменьшилась в 3,2 раза, а характерный размер d — в 1,3 раза. Близкие значения этих величин получены при использовании МУНТ: площадь уменьшилась в 3,57 раза, размер — приблизительно в 1,4 раза. Для сравнения ниже приведены известные результаты применения нанопорошков различного состава для модифицирования достаточно близкого по химическому составу алюминиевого сплава. В работе [16] исследовалось влияние нанопорошков (размер частиц $4 \div 100$ нм), в частности карбида и нитрида кремния, на структуру и свойства отливки из алюминиевого сплава AlSi7Mg. На рис. 4 показано изменение зеренной структуры сплава под действием наномодифицирующих добавок.

В табл. 2 приведены микроструктурные и механические характеристики контрольной (без НМ) и экспериментальных отливок [16]. Из табл. 2 следует, что применение наномодифицирующих добавок в данном случае также приводит к уменьшению характерного размера кристаллического зерна и улучшению механических свойств литого металла.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о возможности осуществления разливки модифицированного наночастицами алюминия в закрытом цикле работы дискового кондукционного МГД-насоса. Высокая степень перемешивания сплава в канале насоса способствует гомогенизации частиц в объеме жидкого металла, что приводит к фор-

Таблица 1

Характеристики элементов структуры контрольного и экспериментальных образцов		
Наличие НМ	S , мкм ²	d , мкм
Без НМ	1945	36,5
AlN	608	27,9
МУНТ	544	26,3

Таблица 2

Микроструктурные и механические характеристики контрольной и экспериментальных отливок				
Наличие НМ	d , мкм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Без НМ	23,90	240	296	4,0
0,05 % AlN + Al + Cu	17,69	253	318	4,3
0,1 % SiC + Cu	17,66	238	317	6,4

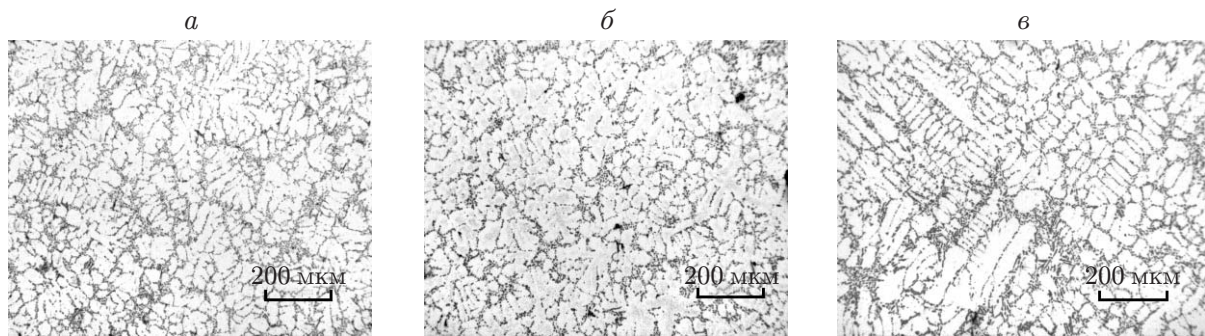


Рис. 4. Микроструктура отливок из сплава AlSi7Mg в отсутствие НМ и при его наличии [16]:

a — без НМ; b — 0,05 % AlN + Al + Cu; v — 0,1 % SiC + Cu

мированию однородной по сечению образца мелкодисперсной кристаллической структуры затвердевшего сплава. Использование в качестве наномодификаторов композиции на основе нитрида алюминия и металлизированных углеродных нанотрубок позволяет уменьшить характерные значения площади поверхности зерна более чем в три раза, а его размера на $30 \div 40$ %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вяткин И. П., Кабаков Г. И., Мушков С. И. и др. Применение кондукционных электромагнитных насосов при разливке первичного магния и магниевых сплавов // МГД в металлургии и литейном производстве. Киев: Ин-т проблем литья АН УССР, 1972. С. 114–119.
2. Полищук В. П. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. Киев: Наук. думка, 1989.
3. Carasev V. G., Kirillov I. R., Ogorodnikov A. P. 3500 m³/h MHD pump for fast breeder reactor // Liquid Metal Magnetohydrodynamics. 1989. V. 10. P. 333–338.
4. Metallurgical technologies, energy conversion, and magnetohydrodynamic flows. Virginia: AIAA, 1993. (Progress in astronaut. and aeronaut. ser.; V. 148).
5. Katsnelson S. S., Pozdnyakov G. A. Experimental study of a centrifugal conductive MHD pump // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. V. 40, N 12. P. 3528–3532.
6. Кацнельсон С. С., Поздняков Г. А. Моделирование режимов работы центробежного кондукционного магнитогидродинамического насоса // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 5. С. 81–87.
7. Мальцев М. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1964.

8. **Строганов Г. В.** Сплавы алюминия с кремнием / Г. В. Строганов, В. А. Ротенберг, Г. Б. Гершман. М.: Металлургия, 1977.
9. **Мондольфо Л. Ф.** Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1979.
10. **Ганиев И. Н.** Модифицирование силуминов стронцием / И. Н. Ганиев, П. А. Пархутик, А. В. Вахобов и др. Минск: Наука и техника, 1985.
11. **Basavakumar K. G., Mukunda P. G., Chakraborty M.** Influence of grain refinement and modification on microstructure and mechanical properties of Al-7Si and Al-7Si-2.5Cu cast alloys // *Materials Characterizat.* 2008. V. 59. P. 283–289.
12. **Choi H., Konishi H., Li X.** Al₂O₃ nanoparticles induced simultaneous refinement and modification of primary and eutectic Si particles in hypereutectic Al-20Si alloy // *Materials Sci. Engng A.* 2012. V. 541. P. 159–165.
13. **Крушенко Г. Г., Фильков М. Н.** Применение нанопорошка нитрида титана с целью получения сложнонагруженных алюминиево-кремниевых сплавов с требуемыми механическими свойствами // *Нанотехника.* 2008. № 3. С. 77–79.
14. **Манолов В., Черепанов А., Лазарова Р., Константинова С.** Свойства алюминиевого сплава AlSi7Mg, модифицированного тугоплавкими нанопорошками // *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Докл. 4-й Всерос. конф., Новосибирск, 22–25 марта 2011 г.* Новосибирск: Нонпарель, 2011. С. 186–190.
15. **Dimitrova P., Stanev S., Velikov A., et al.** Investigations of AlSi7Mg castings refined with SiC nanopowder // *J. Materials Sci. Technol.* 2012. V. 20, N 4. P. 319–324.
16. **Божанова Н. М., Черепанов А. Н., Димитрова Р. Н. и др.** Влияние наноразмерных модифицирующих добавок на структуру и свойства отливок из сплавов AlSi7Mg и AlSi12MgNi // *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Докл. 5-й Всерос. конф., Новосибирск, 26–29 марта 2013 г.* Новосибирск: Параллель, 2013. Т. 2. С. 21–25.

*Поступила в редакцию 22/IX 2014 г.,
в окончательном варианте — 10/III 2015 г.*
