

двух последних элементов идет при большей величине D_v вследствие большей интенсивности газовой выделености, как автокаталитический процесс.

Выводы

Проанализированы экспериментальные данные, полученные при существующих технологиях вакуумирования стали, и показано их удовлетворительное соответствие закону Сиверта.



Список литературы

1. Охотский В. Б. Закон квадратного корня. Плавка // Процессы литья. – 2011. – № 5. – С. 3-8.
2. Hardens F. // St. Eis. – 1956. – № 26. – S. 1221-1228.
3. Физико-химические основы вакуумного процесса в черной металлургии / В. В. Мясников, О. Н. Шнейтер, А. В. Егоров и др. – М.: Наука, 1984. – 61 с.
4. Scalise V., De Negri A., Diccareli V. // Ji Si. – 1960. – V. 195. – P. 260-266.
5. Яровский А. В., Чайкин Б. С., Бокума С. С // Сталь. – 1974. – № 5. – С. 414-417.
6. Охотский В. Б. Модели металлургических систем. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 287 с.
7. Crank J. Mathematics of Diffusion. – Oxford: Clarendon Press, 1956. – 326 p.
8. Скребцов А. М. Радиоактивные изотопы в сталеплавильных процессах. – М.: Металлургия, 1972. – 304 с.

Поступила 06.06.2011

УДК 669.017.16: 537.528

**В. Н. Цуркин, А. В. Синчук, Г. В. Волков*,
Kyung-Hyun Kim****

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

*ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев

**Корейский институт материаловедения, Чангвон

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СИЛУМИНОВ ПУТЕМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Показано, что жидкофазная электрогидроимпульсная обработка сплава Al-Si-Mg (AK7), модифицированного титаном, гарантированно обеспечивает измельчение дендритной структуры, повышение на 20 % предела прочности и до 2 раз относительного удлинения по сравнению со стандартными характеристиками в литом состоянии, формирование высокого уровня механических свойств сплава после термической обработки. Эффективность модифицирования связана с фрагментацией, растворением и компактизацией крупных частиц $TiAl_3$ в акустическом поле под действием кавитации и вязкого трения.

Ключевые слова: модифицирование, электрогидроимпульсная обработка, интерметаллидная частица, растворение, компактизация, механические свойства.

Показано, що рідиннофазна електрогідроімпульсна обробка сплаву Al-Si-Mg (AK7),

Получение и обработка расплавов

модифікованого титаном, гарантовано забезпечує подрібнення дендритної структури, підвищення на 20 % межі міцності і до 2 разів відносного подовження в порівнянні зі стандартними характеристиками в литому стані, формування високого рівня механічних властивостей сплаву після термічної обробки. Ефективність модифікування пов'язана з фрагментацією, розчиненням та компактизацією великих часток $TiAl_3$ в акустичному полі під дією кавітації і в'язкого тертя.

Ключові слова: модифікування, електрогідроімпульсна обробка; інтерметалідна частинка; розчинення; компактизація; механічні властивості.

Is shown that liquid-phase electrohydropulse treatment of Al-Si-Mg (AK7) alloy modified Ti guaranteed provides crushing the dendrite structures, increase of ultimate strength on 20 % and of elongation up to 2 times in comparison with as cast standard characteristics, formation of a high level of mechanical properties after heat treatment. Efficiency of grain refinement is connected with a fragmentation, dissolution and compactization of large particles $TiAl_3$ in acoustic field under action of cavitation and viscous friction.

Keywords: grain refinement, electrical hydro pulse treatment, intermetallide particle, dissolution, compacting, mechanical properties.

Введение

Способ измельчения зерна в силуминах путем химического инокулирования известен более 75 лет, предложено множество его разновидностей, тем не менее поиск в этом направлении не прекращается. Как известно, в современной практике модифицирования наиболее часто используются лигатуры, содержащие титан, цирконий, бор и углерод, добавление которых в расплав приводит к образованию нерастворимых тугоплавких частиц-инокуляторов [1]. Выступая в роли центров кристаллизации α -Al зерна, эти частицы способствуют формированию однородной мелкокристаллической литой структуры.

В работах [2, 3] показано, что эффективность модифицирования зависит от множества факторов: исходного состояния лигатуры, времени выдержки и температуры расплава, количества вводимого модификатора, способа его присадки и т. д. Важное значение имеют равномерность распределения инокулирующих частиц в объеме расплава и их размеры. Если компактные по форме соединения TiB_2 , AlB_2 , $(Ti, Al)B_2$ образуют дисперсные частицы размером менее 1 мкм, то алюминиды Ti и Zr выделяются в виде сравнительно крупных кристаллов реечной или крестообразной формы (более 100 мкм). Такие крупные кристаллы имеют ослабленные адсорбционные связи с алюминием в результате накопления на их поверхности водорода и других примесей и уже не могут выступать в качестве зародышеобразующих подложек, поэтому располагаются в закристаллизовавшемся металле по границам зерен. Наконец, часть интерметаллидных частиц может просто осаждаться на дно и также не участвовать в процессе модифицирования. Отмечается [4], что осаждение нерастворимых частиц в значительной степени определяется исходными размерами в лигатуре, степенью агломерации и растворением в жидком алюминии.

Таким образом, чтобы модифицирование гарантированно обеспечивало измельчение зерна и, следовательно, улучшение механических свойств силуминов, необходимо обеспечить полное усвоение лигатуры расплавом, что подразумевает вовлечение в кристаллизационный процесс максимально возможное количество инокулирующих частиц компактной формы размером менее 1 мкм.

Цель работы – показать влияние жидкофазной электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) на интерметаллидные частицы, зеренную структуру и механические свойства силумина, модифицированного титаном.

Экспериментальная методика

Для проведения экспериментальных исследований использовали доэвтектический алюминиевый сплав АК7, содержащий (в %) 7,6 Si; 1,25 Cu; 0,4 Mg; 0,25 Mn;

Получение и обработка расплавов

0,5 Zn и 1,0 Fe. Расплавление проводили в печи в 4-х графитовых тиглях одинакового объема при температуре 750 °С. За 10 мин до извлечения из печи в каждый тигель вводили лигатуру Al-4 % Ti в количестве 2,4-2,5 % от массы расплава. Тигли последовательно извлекали из печи, производили механическое перемешивание расплава, обеспечивающее однородное распределение растворенной лигатуры, и электрогидроимпульсную обработку, после чего расплав при температуре 650 °С переливали в металлические формы. При этом кокили предварительно подогревали до 300 °С. В последнем (четвертом) тигле расплав ЭГИО не подвергался, охлаждаясь до температуры заливки естественным образом. При обработке небольших (до 10 кг) емкостей с расплавом оптимальная энергия единичного импульса в ходе эксперимента не изменялась и составляла 1,25 кДж, но частота посылки импульсов в расплав и длительность обработки, определяющие скорость и степень завершения протекающих процессов взаимодействия модифицирующей добавки с расплавом, варьировались.

Микроструктуру и механические свойства образцов исследовали как в литом состоянии, так и термообработанном по стандартному режиму T5. Металлографический анализ выполнен с помощью оптического микроскопа «Neofot-32M», микрорентгеноспектральный – электронно-зондового микроанализатора «Superprobe-733».

Результаты

На рис. 1 представлена микроструктура модифицированного сплава, а в табл. 1 – механические свойства образцов, из которых видно, что, несмотря на абсолютно одинаковое количество лигатуры, добавленной к каждой порции расплава, более эффективное измельчение зерна произошло в сплавах, дополнительно подверженных ЭГИО. Чем большее число импульсов было введено в расплав, тем большая степень измельчения дендритов была получена. Например, средний размер фрагментов α -фазы в образцах № 1, 2, 3 и 4 составил соответственно 63, 46 и почти 30 мкм. При этом сплав, подвергнутый ЭГИО, приобрел улучшенный комплекс механических свойств, которые заметно превышают стандартные показатели (в соответствии с требованиями ДСТУ 2839-94 кокильные отливки из сплава АК7 должны иметь не менее, чем $\sigma_b = 157$ МПа и $\delta = 1$ % в литом состоянии, соответственно, не менее, чем $\sigma_b = 196$ МПа и $\delta = 0,5$ % после T5).

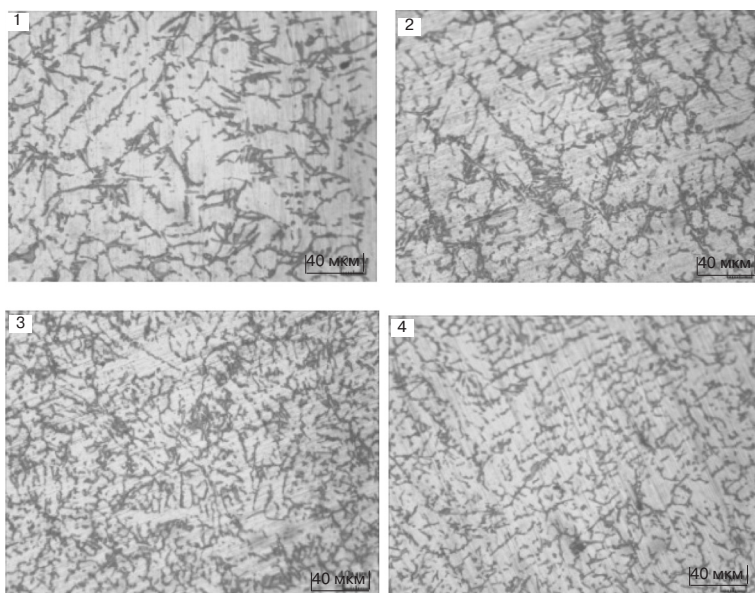


Рис. 1. Микроструктура модифицированного сплава

Таблица 1. Механические свойства модифицированного сплава

Номер образца	Длительность ЭГИО, мин	Частота импульсов, Гц	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	–	–	166 (195)*	153 (161)	1,1 (1,7)
2	1,5	2	185 (228)	122 (151)	2,2 (3,6)
3	1,5	6	189 (231)	147 (164)	1,2 (2,6)
4	2,5	6	196 (216)	151 (187)	1,8 (1,2)
В среднем после ЭГИО	–	–	190 (225)	140 (167)	1,7 (2,5)

* Литое состояние (после Т5)

Полученные результаты легко объясняются при сопоставлении количества интерметаллидных частиц, внесенных в расплав с лигатурой и оставшихся в сплаве после модифицирования (рис. 2). В табл. 2 приведены морфологические и размерные особенности частиц $TiAl_3$, содержащихся в лигатуре, и тех частиц, которые не растворились в расплаве до необходимых размеров, чтобы участвовать в образовании зерен α -фазы. Большинство частиц в исходной лигатуре имеют форму реек длиной более 10 мкм, хотя встречаются и другие морфологические разновидности – крестообразная и сферическая. Можно видеть, что при кристаллизации модифицированного сплава до 5 % таких частиц остаются незадействованными в зародышеобразовании, при кристаллизации сплава, дополнительно подвергнутого ЭГИО, – до 2 %. После комплексной обработки также уменьшается число реечных и крестообразных интерметаллидов, а количество сферических частиц, наоборот, увеличивается приблизительно в 1,5 раза. Средний диаметр сферических частиц в результате ЭГИО уменьшается на 18 %, длина реечных частиц – на 27 %, что, несомненно, свидетельствует о фрагментации и растворении интерметаллидов.

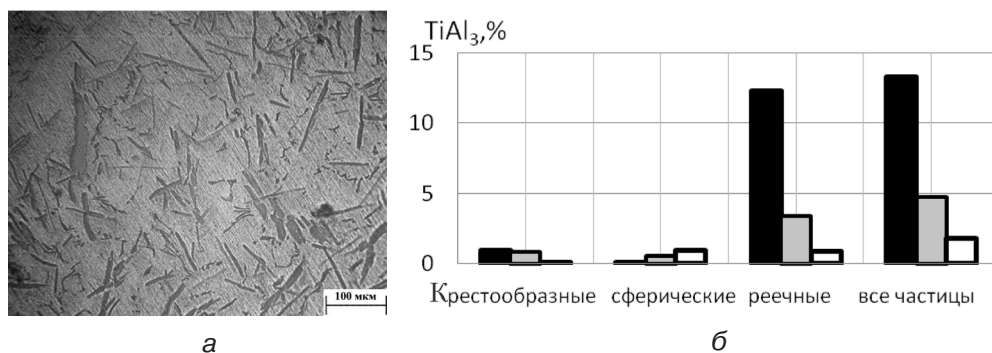


Рис. 2. Интерметаллидные частицы: а – микроструктура лигатуры; б – распределение частиц: ■ – в лигатуре; ▒ – в сплаве без ЭГИО; □ – в сплаве после ЭГИО

Из-за отсутствия данных о кинетике морфологических изменений частиц модификатора трудно провести сопоставление экспериментальных данных с какой-либо теоретической моделью их взаимодействия с расплавом. Тем не менее, значительное уменьшение количества остаточных частиц реечной и особенно крестообразной формы при увеличении объемной доли шаровидных интерметаллидов позволяет предположить, что во время жидкофазной ЭГИО действует несколько механизмов: механическая фрагментация частиц в кавитационной зоне, очищение поверхности частицы в результате вязкого трения, интенсивное диффузионное растворение интерметаллидов.

Наличие кавитационных процессов в обрабатываемом акустическими импуль-

Таблица 2. Характеристики частиц $TiAl_3$

Место нахождения	Содержание частиц $TiAl_3$, %		Длина реечных частиц, мкм	Диаметр сферических частиц, мкм
	реечных	сферических		
В исходной лигатуре	12,3	0,1	28,2	12,3
В образцах без ЭГИО	3,4	0,6	23,2	11,2
В образцах с ЭГИО	0,8	1,0	16,9	9,3

сами расплаве доказано данными работы [5]. В свою очередь, известно, что развитие акустической кавитации значительно облегчается, если в расплаве имеются твердые включения, так как наиболее вероятными местами для разрыва жидкости и образования кавитационных пузырьков являются поверхности раздела фаз. При схлопывании кавитационных пузырьков на поверхности частицы возникают давления, сопоставимые с порядком плотности энергии связи атомов в расплаве (10^9 Па) и достаточные для того, чтобы механически ее разрушить. При наличии концентраторов напряжения, которыми характеризуются включения крестообразной формы, разрушение облегчается. Результаты эксперимента показывают, что именно такие включения претерпели наибольшие морфометрические изменения. Кроме того, пульсирующий на поверхности пузырек может адсорбировать сосредоточенный в трещинах интерметаллидных частиц газ, а трещины под высоким давлением при схлопывании пузырька могут заполняться расплавом, что повышает вероятность участия такого включения в кристаллизационном процессе.

Силы вязкого трения возникают при течениях в жидкости также на границе раздела фаз. Они пропорциональны скорости жидкости и ее динамической вязкости и обратно пропорциональны квадрату характерного размера частицы. В результате вязкого трения поверхность частицы может очищаться от плен и загрязнений и становится центром зародышеобразования, как это определено ее изоморфизмом с кристаллизующимся металлом.

Процесс растворения твердого включения в спокойной жидкости обусловлен в основном диффузионными процессами в приграничном слое. В случае акустического воздействия возникают силы вязкого трения, облегчающие отрыв атомов от поверхности частицы и, как правило, в зонах с малым радиусом кривизны (на торцах реечных и крестообразных частиц), а акустические течения ускоряют отвод диффундирующих от частицы атомов и расширяют зону их миграции. Это также один из механизмов, участвующих в процессе растворения крупных частиц модификатора, который согласуется с результатами микрорентгеноспектрального анализа образцов. Проведенное измерение интенсивности рентгеновского излучения $Ti_{K\alpha}$ в реечных интерметаллидах и в приграничной зоне показало, что ширина приграничной зоны (расстояние от частицы, на котором интенсивность рентгеновского излучения падает до нуля) после дополнительной ЭГИО в среднем увеличивается в 2 раза по сравнению с только одним модифицированием. При этом снижается градиент концентрации титана в приграничной зоне, что свидетельствует об ускорении отвода атомов от твердой частицы в расплав.

Выводы

Экспериментальные данные показывают, что процессы растворения лигатуры, ее усвоения расплавом, компактизации инокулирующих частиц при дополнительном внешнем импульсном воздействии на расплав проходят более эффективно, в результате чего однозначно измельчается зеренная структура и улучшается комплекс механических свойств по сравнению со сплавом, в котором эти процессы протекают

естественным образом. Дальнейшая разработка такого комплексного способа обработки расплава, продиктованная требованиями высокотехнологичных производств к силуминам, должна обеспечить не только повышение эффекта модифицирования, но и экономию дорогостоящих модифицирующих добавок.



Список литературы

1. Конкевич В. Ю., Овчинников Ю. В., Шадаев Д. А. Лигатуры для легирования и модифицирования алюминиевых сплавов – состояние рынка, проблемы и перспективы производства // Технология легких сплавов. – 2006. – № 1-2. – С. 137-142.
2. Murty B. S., Kori S. A., Chakraborty M. Grain Refinement of Aluminium and its Alloys by Heterogeneous Nucleation and Alloying // International Materials Reviews. – 2002. – Vol. 47, № 1. – P. 3-29.
3. Quested T. E. Understanding Mechanisms of Grain Refinement of Aluminium Alloys by Inoculation // Materials Science and Technology. – 2004. – Vol. 20, № 11. – P. 1357-1369.
4. Kumar Vinod G. S., Murty B. S., Chakraborty M. Settling Behaviour of TiAl₃, TiB₂, TiC and AlB₂ Particles in Liquid Al During Grain Refinement // International Journal of Cast Metals Research. – 2010. – Vol. 23, № 11. – P. 193-204.
5. Исследование кавитационных возмущений в жидком металле, подвергнутом электрогидроимпульсной обработке /В. Н. Цуркин, А. В. Синчук, Я. В. Крептюк, Ю. Н. Дегтев // Процессы литья. – 2007. – № 4. – С. 9-15.

Поступила 21.06.2011

УДК 669.715:538.244

Л. П. Пужайло, А. В. Серый, С. Л. Поливода

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МГД-УСТАНОВКАХ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И РАЗЛИВКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Исследовано распределение магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитов различной конфигурации. Определены направление силовых линий и индукция магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитов, а также область существования магнитного поля. Проведен сравнительный анализ исследованных магнитных полей и определены области рациональных мест расположения рабочей зоны в МГД-установках с различными типами электромагнитов. Установлено, что при расположении рабочей зоны под углом 40-50° в случае применения электромагнита с полюсами, расположенными под углом 90° друг к другу, толщина футеровки в верхней части рабочей зоны увеличивается в 2-3 раза, что обеспечивает высокую эксплуатационную надежность канала. На основании проведенных исследований выбран тип электромагнита вакуумной МГД-установки для приготовления и разливки алюминиевых сплавов, который обеспечивает увеличение срока службы канала в 4-5 раз.

Ключевые слова: электромагниты, МГД-установка, магнитное поле, алюминиевые сплавы.