

УДК 669.017.16: 537.528

А. В. Синчук, В. Н. Цуркин, Н. А. Федченко

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

СНИЖЕНИЕ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ Fe-СОДЕРЖАЩИХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ НА СИЛУМИНЫ ПУТЕМ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА

Рассмотрено влияние жидкофазной электрогидроимпульсной обработки на морфологию и химический состав Fe-содержащих фаз в силуминах с различным содержанием железа. Показано, что обработка обеспечивает измельчение игольчатых интерметаллидов, выделение Fe-содержащих фаз в компактном виде, перераспределение химических элементов между интерметаллидами и улучшение механических свойств сплавов.

Ключевые слова: Fe-содержащий интерметаллид; электрогидроимпульсная обработка; морфология фаз; компактизация; механические свойства.

Розглянуто вплив рідкофазної електрогідроімпульсної обробки на морфологію та хімічний склад фаз, що містять залізо, в силумінах з різним вмістом заліза. Показано, що обробка забезпечує здрібнення голчастих інтерметалідів, виділення фаз, що містять залізо, в компактному вигляді, перерозподіл хімічних елементів між інтерметалідами та підвищення механічних властивостей сплавів.

Ключові слова: інтерметалід, що містить залізо, електрогідроімпульсна обробка; морфологія фаз; компактизація; механічні властивості.

Influence of liquid-phase electrical hydro pulse treatment on morphology and chemical composition of Fe-containing phases in silumins with the various maintenance of iron is considered. It is shown, that processing provides crushing needle intermetallides, allocation of Fe-containing phases in a compact kind, redistribution of chemical elements between intermetallides and improvement of mechanical properties of alloys.

Keywords: Fe-containing intermetallide, electrical hydro pulse treatment, morphology of phases, compacting, mechanical properties.

Fe-содержащим фазам в литейных алюминиевых сплавах, как и способам управления их морфологией, уделяется пристальное внимание, которое обусловлено всевозрастающим использованием более дешевых, но, как правило, загрязненных вторичных сплавов в составе шихты, а отрицательная роль железа в алюминиевых сплавах хорошо известна. Fe-содержащие фазы (FeAl_3 , Al_5SiFe , Al_8SiFe_2 и другие), в основном, имеют грубокристаллическое строение и негативно влияют на меха-

ISSN 0235-5884. Процессы литья. 2011. № 2 (86)

нические свойства сплавов, особенно на относительное удлинение. Наибольшую опасность представляет β -фаза Al_5SiFe , кристаллы которой выпадают в виде хрупких пластин, длина которых иногда составляет более 100 мкм. Эта фаза создает эффект охрупчивания, что значительно снижает механические характеристики и коррозионную стойкость алюминиевых сплавов.

Нейтрализация вредного влияния железа на свойства сплавов возможна при условии получения Fe-содержащих фаз в компактном виде, что достигается введением небольших добавок хрома, молибдена, никеля, ванадия, но, чаще всего, марганца, образующего в силуминах с железом компактную фазу $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$ [1]. Но, во-первых, чрезмерная добавка марганца к силуминам вызывает образование твердых фаз, затрудняющих обработку резанием, а, во-вторых, возможность полной компактизации интерметаллидов в сплавах, содержащих свыше 1,5 %, только за счет легирования марганца еще не исследована. Другим способом изменения морфологии кристаллизующихся фаз, в том числе интерметаллидных, является затверждение в условиях скоростного охлаждения, а при скоростях порядка 10^3 - 10^5 К/с выделение грубых включений первичных Fe-содержащих фаз можно полностью подавлять [2]. Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что путем наложения внешних воздействий на расплавы в процессе плавки или в период кристаллизации также можно оказывать воздействие на образующиеся интерметаллиды. Имеются сообщения о положительном влиянии ультразвуковой обработки [3], обработке расплава в магнитогидродинамическом устройстве [4], обработке расплава электрическим током [5, 6]. Несомненно, успешными можно назвать результаты работы [7], где за счет роторной тепло-силовой обработки расплава в интервале кристаллизации были измельчены и компактизированы интерметаллиды в сплаве АК7, содержащем 6 % Fe.

В свете изложенного представляется актуальным определить влияние жидкофазной электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) на Fe-содержащие интерметаллиды в силуминах различного химического состава. Предпосылками для такого исследования являются накопленные экспериментальные данные по ЭГИО жидких алюминиевых расплавов, которые свидетельствуют об изменении размеров и морфологии структурных составляющих в обработанных сплавах: дендритов алюминиевого раствора, частиц эвтектического кремния, кристаллов первичного кремния и т. д. Сюда можно отнести и данные работы [4], где алюминиевый расплав подвергали электрогидроимпульсному воздействию в тигле работающей МГД-установки. После окончания такой комплексной обработки количество Fe-содержащих фаз в сплаве заметно уменьшилось, а на стенках каналов МГД-установки были обнаружены твердые железистые наросты. Это позволило сделать авторам заключение об избирательном влиянии волн давления, возникающих в расплаве при ЭГИО, на растворенные химические элементы в зависимости от атомной массы, что могло вызывать циркуляцию обогащенных железом порций расплава вдоль стенок канала.

В данной работе жидкофазной ЭГИО подвергали сплавы АК7 и АК8М2, содержащие различное количество железа. Выплавку осуществляли при 750 °С. ЭГИО подвергали порцию расплава массой 1 кг в температурном интервале 700-650 °С в течение 1 мин при различной частоте следования импульсов с энергией 1, 25 кДж. Металл разливали при 630 °С в подогретые до 300 °С металлические формы, что обеспечивало скорость охлаждения в пределах 2-4 °С/с. Таким образом, получали цилиндрические образцы диаметром 20 мм и длиной 200 мм, образцы сплава АК7 – из чушкового сплава этой же марки, образцы сплава АК7 с повышенным содержанием железа – путем переплавки вторичных материалов, образцы сплава АК8М2 с повышенным содержанием железа – путем добавления стальной стружки к чушковому сплаву этой же марки.

Химический анализ образцов сплава АК7, полученных из чушкового сплава (табл.1), показал, что содержание железа в них находится в пределах требований

Таблица 1. Характеристики сплава АК7

Номер образца	Содержание элементов, %					Длина игольчатых частиц β -фазы, мкм	σ_v , МПа	δ , %
	Si	Cu	Mg	Mn	Fe			
выплавка из чушкового сплава								
1 (без ЭГИО)	7,7	0,8	0,4	0,3	0,9	290	150	1,5
2	7,5	0,9	0,4	0,3	0,9	«китайские иероглифы»	180	4,0
выплавка из лома								
3 (без ЭГИО)	7,2	1,0	0,3	0,5	1,6	320	88	0,3
4	7,5	1,0	0,3	0,5	1,6	65 «китайские иероглифы»	147	1,5

ДСТУ 1583-93, тем не менее Fe-содержащая фаза здесь присутствует. На рис. 1 показано, что в контрольном металле она образует длинные тонкие иглы, трансформируясь в «китайские иероглифы» в опытных образцах. Согласно Л. Ф.Мондольфо [8], первая из этих морфологических разновидностей характеризует β -фазу Al_5SiFe , вторая – фазу $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$. Механические испытания показали, что и прочность, и относительное удлинение сплава после обработки заметно повышаются (см. табл.1).

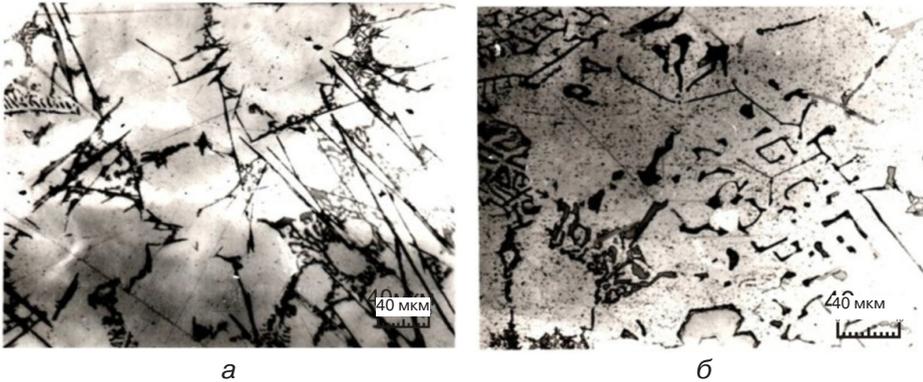


Рис. 1. Микроструктура сплава АК7: а – контрольный образец; б – опытный образец

ЭГИО аналогичное влияние оказывает на сплав АК7, выплавленный из лома. В контрольных образцах этого сплава Fe-фаза также выделяется исключительно в игольчатом виде, причем ее количество в 1,2-1,5 раза превышает количество в образцах, полученных из чушкового сплава. В опытных образцах интерметаллиды частично выделяются в виде «китайских иероглифов», а оставшаяся часть – мелкодисперсных игл. При этом крайне низкие механические свойства сплава, содержащего 1,6 % Fe, после ЭГИО приближаются к уровню ($\sigma_v = 157$ МПа, $\delta = 2$ % для сплава АК7 при литье в кокиль), требуемому ДСТУ.

В табл. 2 приведены характеристики, а на рис. 2 – оптические и электронные изображения жаропрочного силумина АК8М2, искусственно насыщенного железом до концентрации более 2 %. Fe-содержащая фаза в контрольных образцах этого силумина имеет форму довольно крупных (длина около 300 мкм, толщина до 5 мкм) игольчатых включений. Микрорентгеноспектральный анализ, выполненный с помощью энергодисперсионного спектрометра фирмы Selmi, показал, что основу этих включений составляют алюминий, кремний, железо и марганец, массовые

Таблица 2. Характеристики сплава АК8М2

Номер образца	Частота следования импульсов, Гц	Содержание элементов, %					Длина игольчатых частиц β-фазы, мкм	σ _в , МПа	δ, %
		Si	Cu	Mg	Mn	Fe			
1 Без ЭГИО	-	9,6	3,3	0,3	0,3	2,5	300	137	1,67
2	2	9,8	3,4	0,2	0,3	2,3	143	185	1,67
3	3	9,1	3,2	0,3	0,3	2,2	85	190	1,67
4	6	9,0	3,2	0,4	0,2	2,0	185	154	1

доли которых соотносятся как 75: 9,7: 13,9: 1,4 (в среднем). Кроме того, железо содержится в мелких лепестковых образованиях фазы, содержащей приблизительно (в %) 73,8 Al, 4,7 Si, 17,5 Fe, 4,5 Mn. Медь практически вся сосредоточена в белых лепестково-чешуйчатых включениях, которые сами содержат мизерное количество железа, но зачастую прилегают к Fe-содержащим иглам и ориентированы в том же направлении.

Игольчатые интерметаллиды после ЭГИО существенно измельчаются наравне с другими структурными составляющими сплава, их объемная доля уменьшается почти в 2 раза, а стехиометрический состав остается таким же, как и в контрольных образцах. Однако после обработки в сплаве появляются равномерно распределенные по сечению образцов включения новой компактно-ограненной фазы (20 мкм на 20 мкм), которая по сравнению с игольчатой фазой содержит большее количество железа и марганца (рис. 2 б, г). Эта компактная фаза по элементному составу не соответствует известному интерметаллиду $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$, который должен содержать одинаковое массовое количество железа и марганца. Микротвердость этой фазы составляет около 200 кг/мм², тем не менее увеличение твердости сплава не обнаруживается – как контрольные, так и опытные образцы характеризуются значением 100 НВ. Механические испытания показали, что пластичность сплава после обработки также не изменилась, но предел прочности заметно повысился, причем, существует оптимальный режим обработки (энергия в импульсе – 1,25 кДж, частота следования импульсов – 2 Гц), который обеспечивает максимальные изменения структуры и прочности сплава.

Объяснить наблюдаемые изменения морфологии Fe-содержащих интерметаллидов в обработанном медистом силумине довольно сложно, так как до сих пор не существует единой точки зрения даже относительно химических формул и состава тройных соединений Al-Si-Fe. В данном случае мы имеем четвертные фазы на основе системы Al-Si-Fe-Mn, механизмы образования которых еще предстоит изучить: они могут образовываться непосредственно из расплава или по перитектической реакции различной степени завершенности на момент затвердевания отливки и могут быть не химическими соединениями, а твердыми растворами.

В ходе эксперимента при помощи высокочастотного измерительного комплекса (10 измерений в секунду) с фиксацией данных на персональный компьютер регистрировались кривые охлаждения расплава, залитого в кокиль. Кривые, представленные на рис. 3, позволяют видеть, что кристаллизация подвергнутого обработке расплава начинается при переохлаждении в 6 °С и проходит быстрее по сравнению с контрольным металлом. Суть такого воздействия на расплавы, подробно описанная в данной работе ранее (например, работа [9]), сводится к тому, что во время ЭГИО создается большая степень однородности жидкого металла по температуре и распределению химических элементов на всех уровнях, начиная с устранения макросегрегаций и заканчивая формированием топологического разупорядочения на

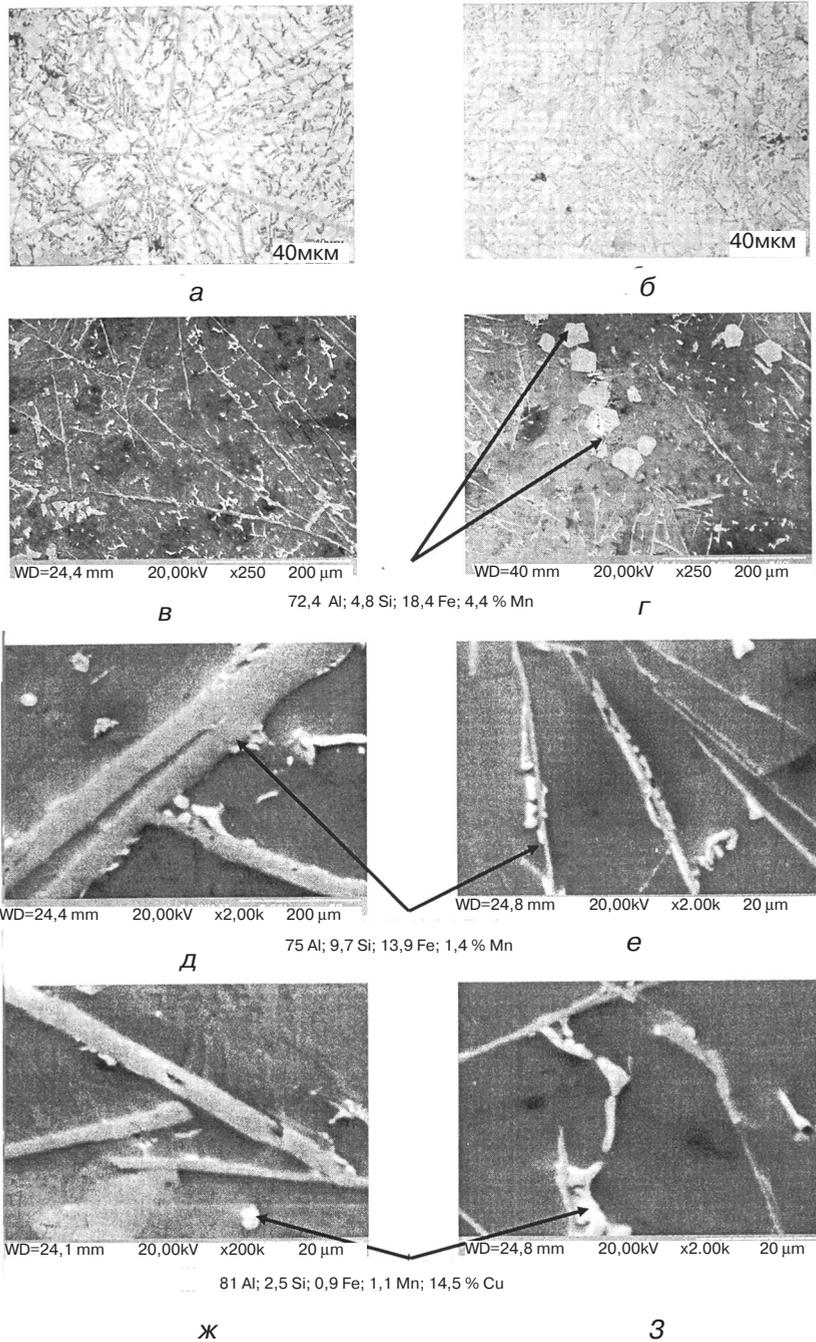


Рис. 2. Микроструктура сплава АК8М2: а, б – оптическая микроскопия; в-з – электронная микроскопия; а, в, д, ж – контрольный образец; б, г, е, з – опытный образец

атомарном уровне. Началу кристаллизации такого однородного расплава соответствуют более низкие температуры, так как требуется определенное время для прохождения обратного процесса – формирования флуктуаций, зародышеобразующих кластеров и т. п. Тем самым создаются условия для измельчения зерна, подавления роста грубых игольчатых интерметаллидов и выделения их в мелкодисперсном виде. Вопрос о том, образуется ли в условиях ускоренного охлаждения компактная ограниченная фаза, наблюдаемая экспериментально, пока остается открытым.

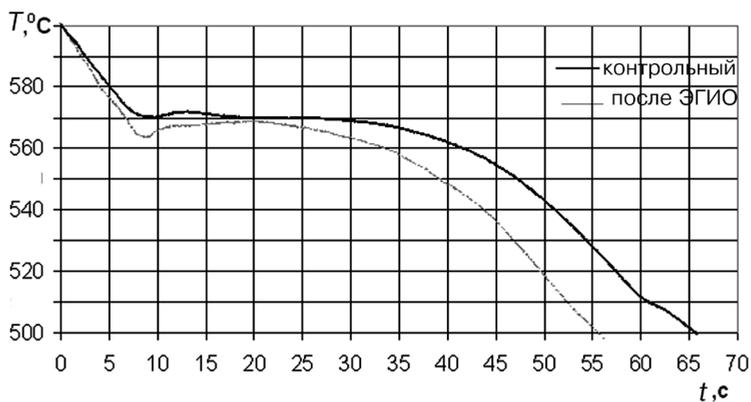


Рис. 3. Кривые охлаждения сплава АК8М2

Таким образом, представленные результаты дают возможность использовать жидкофазную электрогидроимпульсную обработку в технологических процессах производства отливок из вторичных алюминиевых сплавов. Образующиеся в результате обработки мелкодисперсные и компактные интерметаллиды не только оказывают менее вредное влияние на силумины, но и приобретают свойство упрочняющих фаз, что дает возможность получать из загрязненного железом сырья сплавы с требуемым и повышенным комплексом механических свойств.



Список литературы

1. Альтман М. Б., Стромская Н. П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 127 с.
2. Калиниченко А. С., Немененок Б. М., Калиниченко В. А. Снижение негативного влияния повышенного содержания железа в алюминиевых сплавах //Литейн. пр-во. – 2004. – № 3. – С. 21-22.
3. Osava Yoshiaki, Takamory Susumu, Kimura Takashi. Control of solidified structure of Al-Si-Fe alloy intermetallic compounds by ultrasonic vibration //Journal of Japan Foundry Engineering Society. – 2006. – V. 78, № 2. – P. 65-70.
4. Дубодёлов В. И., Середенко В. О., Середенко О. В. Вплив електромагнітного поля на фази алюмінієвого сплаву в каналі магнітодинамічної установки //Металознавство та обробка металів. – 2007. – № 2. – С. 6-10.
5. Деев В. Б., Башмакова Н. В., Приходько О. Г., Селянин И. Ф. Исследование влияния электрического тока на кристаллизацию алюминиевых сплавов с различным содержанием железа // Ползуновский альманах. – 2008. – № 3. – С. 77-81.
6. Петров С. С., Пригунов С. В., Пригунова А. Г., Ключник Д. Н. Структурные и фазовые превращения в силуминах под воздействием жидкофазной обработки электрическим током // Металлофизика и новейшие технологии. – 2008. – Т. 30, № 8. – С. 1129-1137.
7. Головаченко В. П., Борисов Г. П., Дука В. М. Влияние теплосилового обработки сплава АК7 с 6 % Fe на формирование железосодержащих фаз //Процессы литья. – 2008. – № 5. – С. 57-61.
8. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 595 с.
9. Цуркин В. Н., Синчук А. В. Влияние электрогидроимпульсной обработки на термодинамическое состояние расплава и процесс кристаллизации //Процессы литья. – 2007. – № 1-2. – С. 70-74.

Поступила 27.07.2010