

## СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗА НА СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ В КОКИЛЕ

Доценко Ю. В., Селиверстов В. Ю., Доценко В. П.

Проанализированы технологические методы, направленные на нейтрализацию негативного влияния железа на свойства алюминиевых сплавов. Показано, что интересным направлением является проведение исследований, направленных на определение оптимальных режимов совместного применения процессов модифицирования и затвердевания сплава в неравновесных условиях, обеспечиваемых тем или иным способом внешнего физического воздействия. Приведены результаты исследования по влиянию совместного модифицирования и газодинамического воздействия на свойства отливок из сплава АК5М с повышенным содержанием железа. Показано, что применение комплексных технологий воздействия на кристаллизующийся металл является перспективным направлением.

Проаналізовані технологічні методи, спрямовані на нейтралізацію негативного впливу заліза на властивості алюмінієвих сплавів. Показано, що цікавим напрямком є проведення досліджень, спрямованих на визначення оптимальних режимів спільного застосування процесів модифікування й затвердіння сплаву в нерівноважних умовах, забезпечуваних тим або іншим способом зовнішнього фізичного впливу. Наведені результати дослідження із впливу спільного модифікування й газодинамічного впливу на властивості виливків зі сплаву АК5М с підвищеним вмістом заліза. Показано, що застосування комплексних технологій впливу на метал, що кристалізується, є перспективним напрямком.

Technological methods aimed at neutralization of negative influence of iron on properties of aluminium alloys are analyzed. It is shown that interesting direction is realization of researches directed at determination of the optimal modes of joint application of processes of modification and crystallization of alloy in non-equilibrium conditions, provided by that or by another method of external physical influence. The results of research on influence of the joint modification and gas-dynamic affect on properties of castings from alloy AK5M with increased content of iron are given. It is shown that application of complex technologies of effecting crystallizable metal is a perspective direction.

Доценко Ю. В.

канд. техн. наук, доц. НМетАУ

Селиверстов В. Ю.

канд. техн. наук, доц. НМетАУ

Доценко В. П.

канд. техн. наук, доц. ОНПУ  
[S-V-Y@mail.ru](mailto:S-V-Y@mail.ru)

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

ОНПУ – Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса

УДК 621.746.6:669.046.516.4:669.715

Доценко Ю. В., Селиверстов В. Ю., Доценко В. П.

**СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗА НА СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ В КОКИЛЕ**

Одной из проблем при получении качественных отливок из алюминиевых сплавов является повышенное содержание в них железа.

Железо является негативной примесью в алюминиевых сплавах, образуя соединения различного состава (FeAl<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>SiFe, Al<sub>4</sub>Si<sub>2</sub>Fe, Al<sub>5</sub>SiFe и др.) [1]. Все железосодержащие фазы при обычных температурах кристаллизации сплавов имеют крупнокристаллическое строение и поэтому оказывают сильное влияние на снижение механических свойств, в особенности пластичности. Например, в доэвтектических силуминах железо образует с компонентами сплава тройную промежуточную фазу β (AlFeSi), кристаллизующуюся в форме грубых иглообразных выделений, резко снижающих пластические свойства сплавов. Влияние железа на относительное удлинение δ сплава АК9 ГОСТ 1583-89 показано на рис. 1 [2].

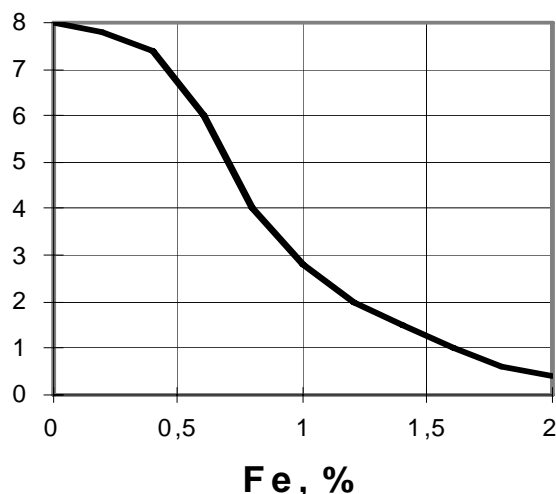


Рис. 1. Влияние железа на относительное удлинение (δ) сплава АК9, ГОСТ 1583-89

Влияние железа на относительное удлинение (δ) сплава АК9 ГОСТ 1583-89 носит полиномиальную зависимость и описывается уравнением:

$$\delta = -3,1141 \cdot Fe^4 + 14,581 \cdot Fe^3 - 20,75 \cdot Fe^2 + 4,2909 \cdot Fe + 7,928,$$

где δ – величина относительного удлинения в %; Fe – содержание железа в %.

Основными источниками насыщения алюминиевых расплавов железом являются чугуны тигли раздаточных и плавильных печей, заливочные ковши, переплавляемый алюминиевый лом, содержащий стальные вкладыши и элементы кремния, не удаленные перед плавкой.

В сплавах системы Al–Si эвтектический кремний и железосодержащие фазы имеют ковалентный тип межатомных связей, что обуславливает их направленность при кристаллизации. Для уменьшения анизотропии силовых полей валентных электронов в образующемся зародыше при кристаллизации необходимо изменить характер межатомного взаимодействия.

Один из возможных вариантов изменения формы и размеров включений фаз с кова-

лентным типом межатомных связей – введение в расплав примесей, атомы которых, растворяясь в растущем кристалле, ослабляют ковалентную составляющую связи между его атомами, и тем самым уменьшают ориентирующее действие кристалла на соприкасающуюся с ним жидкую фазу.

Если в отношении изменения формы включений эвтектического кремния этот вопрос успешно решен, то применительно к модифицированию железосодержащей фазы имеются существенные трудности в его практической реализации. Поэтому наиболее широко применяются профилактические мероприятия с целью исключения контакта стального и чугунного плавно-заливочного инструмента и тиглей с алюминиевым расплавом, причем главная сложность получения качественного покрытия (обмазки) чугунных и стальных тиглей – обеспечение требуемой стойкости покрытия и его механической прочности. Поэтому задача, связанная с разработкой технологических решений направленных на устранение вредного влияния железа в алюминиевых литейных сплавах является актуальной.

Железо обладает ограниченной растворимостью в алюминии. При температуре, близкой к точке плавления алюминия, из сплава, содержащего железа более 1,7 %, выделяются кристаллы  $Al_3Fe$ . Эти кристаллы обладают большей плотностью, чем алюминиевый сплав, и имеют форму крупных пластин. Поэтому после вымораживания алюминидов железа его можно отделить от сплава одним из нижеприведенных способов [3].

Отстаивание алюминиевого сплава, богатого железом, в течение нескольких часов показало, что железные составляющие концентрируются в нижней части ванны и частично по стенкам тигля. Верхняя часть расплава при этом получается обедненной железом. Так, алюминий с 2,76 % железа после семичасового отстаивания при 700 °С содержал железа на глубине 28, 36 и 45 см соответственно 1,59; 2,01 и 2,75 %. Таким образом, этим методом нельзя в достаточной степени снизить содержание железа и четко отделить железистую составляющую.

Для лучшей концентрации железа предпринимались попытки применить направленную кристаллизацию, т. е. искусственное охлаждение дна тигля [4]. В этом случае кристаллы твердой фазы выделяются только снизу. Поскольку в таких условиях охлаждения тепловая конвекция внутри жидкости отсутствует, образующиеся кристаллы не должны разноситься по всему объему металла. Для нормального хода кристаллизации необходимо, чтобы скорость диффузии в жидкости была равна или превышала скорость охлаждения. При простом отстаивании редкие и довольно крупные кристаллы лежат тонким (5–8 мм) слоем на дне тигля, при направленной кристаллизации толщина слоя увеличивается (до 20–25 мм). При содержании в сплаве 3–4 % железа этим способом можно получить 3/4 объема сплава с 1,7–1,9 % железа. Таким образом, отстаивание с направленной кристаллизацией принципиально дает возможность отделить эвтектику от твердой фазы, но производительность этого процесса исключительно низка.

Чтобы ускорить процесс разделения жидкой и твердой фаз, различных по плотности, применяли центрифугирование. При проведении опытов только при больших оборотах центрифуги удавалось снизить содержание железа в верхних слоях с 3 до 1,5–1,7 %.

Отрицательные результаты были получены также при попытке отмагнитить железосодержащую фазу алюминиевого сплава, так как  $Al_3Fe$  не восприимчиво. Удовлетворительное отделение твердой фазы от жидкой было достигнуто фильтрованием.

Недостаточно сведений о влиянии внешних воздействий и модифицирования на форму и размеры железосодержащих фаз в алюминиевых сплавах [5–8].

Целью статьи является анализ способов нейтрализации негативного влияния железа в алюминиевых литейных сплавах путем применения различных технологических приемов, а также влияние модифицирования и газодинамического воздействия на свойства сплава АК5М с повышенным содержанием железа.

Эвтектики двойных сплавов содержат большое количество металла примеси. Напри-

мер, эвтектическое содержание железа равно 1,7 %, кремния 1,56 % и пр. Разделять такие фазы не имеет практического смысла. Однако при добавлении в сплав некоторых компонентов эвтектическая точка перемещается влево и содержание металла примеси в эвтектическом сплаве может быть значительно снижено. Так, при введении в алюминий, загрязненный железом, 25–30 % меди или примерно такого же количества никеля удастся получить расплав с пониженным содержанием железа. При введении 37 % магнезия теоретически можно получить расплав с содержанием железа около 0,03 %. При добавке марганца в количестве 1,5–3 % также значительно снижается содержание железа.

Кроме железа, из алюминия можно выделить и другие металлы. Например, добавка магнезия может вытеснить из алюминия в виде алюминидов марганец, хром, церий, титан, ванадий и молибден, а в виде силицида магнезия – кремний. Добавкой цинка можно уменьшить растворимость алюминидов тяжелых металлов в алюминиевых сплавах.

Так как вводимые металлы в основном остаются в остаточном расплаве, то получаемые алюминиевые сплавы пригодны лишь в качестве лигатур или подлежат дальнейшей переработке. Однако в отдельных случаях возможно при введении сравнительно небольших добавок снизить содержание железа до допустимого уровня. Так, например, марганец эффективно действует на отделение железа и вместе с тем входит в состав многих сплавов как компонент.

В последние годы получило развитие другое направление – нейтрализация вредного воздействия Fe на свойства сплавов Al за счет изменения морфологии образующихся избыточных фаз легированием. В результате легирования интерметаллиды, приобретая сферическую форму, не оказывают отрицательного влияния на пластичность, трещиностойкость и др. Положительные результаты получены при введении в расплавы силуминов бериллия, марганца, церия и многих других переходных металлов [4]. Это направление более перспективно, поскольку позволяет «вернуть к жизни» ряд вторичных сплавов, ранее применявшихся для изготовления только второсортных отливок, и что важнее, служит основой для дальнейших исследований, направленных на повышение свойств сплавов Al за счет их упрочнения железосодержащими соединениями. Что и было подтверждено результатами работ [4] по упрочнению сплавов вводом в них заранее приготовленных мелкодисперсных порошков интерметаллидов  $Al_3Fe$ , либо механическим измельчением уже образовавшихся в расплаве интерметаллидов. Известно также [3], что мелкодисперсные интерметаллиды Fe благоприятной формы можно получать непосредственно в сплавах Al при высокоскоростной кристаллизации, иными словами, при управляемой кристаллизации в определенных режимах и параметрах, обеспечивающих выделение избыточной фазы с заданной морфологией и размерами. Естественно, что управлять процессом образования интерметаллидов можно только всесторонне его исследовав.

Процесс образования железосодержащих фаз (и не только их) определяется не столько термодинамическими режимами самой кристаллизации, сколько состоянием и структурой кристаллизующегося расплава, степенью его макро- и микронеоднородности. В свою очередь состояние расплава зависит от комплекса факторов, в том числе и от характера процесса расплавления и растворения шихтовых материалов при плавке, в частности от кинетики растворения Fe, условий ввода, качества поверхности, первичной твердой структуры, наличия растворенных газов, примесей и т. п. Процессом растворения Fe в Al и его сплавах во многом, если не в основном, определяется и процесс образования избыточных железосодержащих соединений. На процессы растворения железа и образования интерметаллидов существенно влияют температура и скорость изменения температур на различных стадиях.

Результаты экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования влияния комбинированной технологии газодинамического воздействия и модифицирования карбонитридом титана (TiCN) проводили на литых заготовках из алюминиевых сплавов химический состав, которых указан в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава, применяемого для исследований

Al	Si	Fe	Ti	Mg	Cu	Zn
Основа	5.5	0.6	0.14	0.6	1.45	0.3

Отливку «Опорный наконечник стойки конвейера» массой 1,1 кг заливали из сплава № 2 в подогретый и окрашенный чугунный кокиль с минимальной толщиной стенки 40 мм. Температура заливки – 640 °С. Схема отливки «опорный наконечник стойки конвейера» представлена на рис. 2.

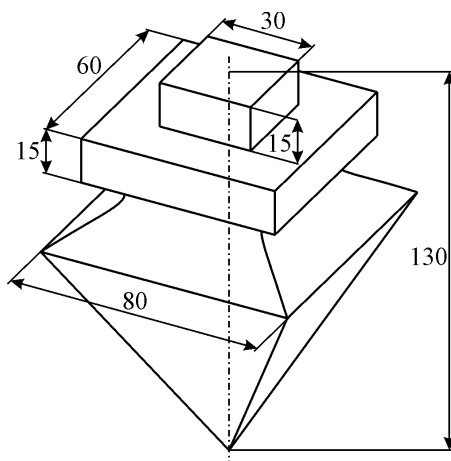


Рис. 2. Схема отливки «опорный наконечник стойки конвейера»

Технологический процесс газодинамического воздействия на расплав в кокиле проводили с начальными показателями давления 0,15–0,2 МПа и последующим наращиванием до 2–3,5 МПа в соответствии с расчетной динамикой нарастания давления в системе отливка-устройство для ввода газа.

На рис. 3 представлена микроструктура сплава АК5М до и после обработки.

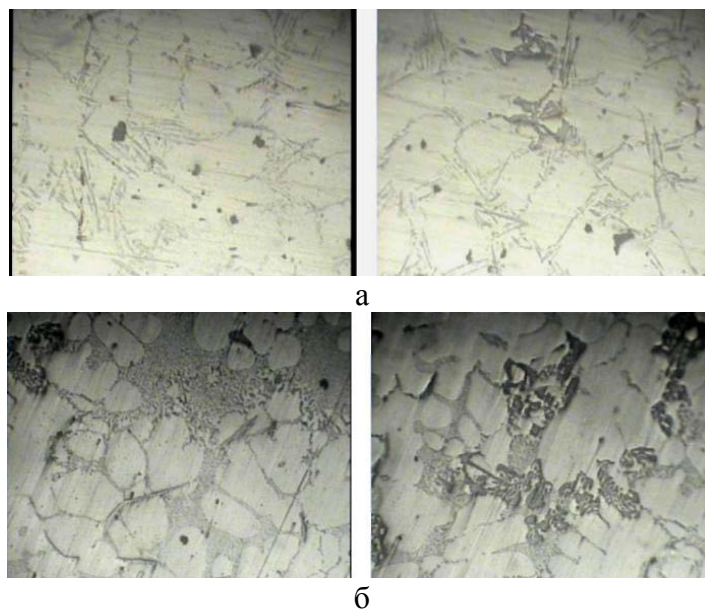


Рис. 3. Микроструктура сплава № 1:

а – до обработки; б – после комбинированного воздействия (× 106)

В табл. 2 приведены результаты испытаний по определению механических свойств

металла отливок из сплава АК5М, полученного с применением комбинированной технологии газодинамического воздействия и модифицирования в сравнении с соответствующими свойствами литого металла, полученного по традиционной технологии литья в кокиль.

Таблица 2

Механические свойства металла отливок из сплава АК5М

№ образца	$\sigma_s$ , МПа	НВ, МПа	$\delta$ , %
1	165,3	510	2,0
2	163,6	500	1,9
3	165,1	500	1,9
4	195,3	512	2,30
5	193,8	508	2,29
6	194,2	511	2,31

В результате применения указанной технологии удалось измельчить и сфероидизировать железосодержащие фазы, повысить уровень механических свойств на 15–20 %, сократить количество брака отливок по рыхлотам и газовым раковинам на 28 %.

### ВЫВОДЫ

1. Проанализированы технологические методы, направленные на нейтрализацию негативного влияния железа на свойства алюминиевых сплавов.

2. Показано, что большой интерес представляет совместное применение процессов модифицирования и затвердевания алюминиевых сплавов в неравновесных условиях для повышения механических свойств алюминиевых литейных сплавов с повышенным содержанием железа.

3. В результате проведенных исследований по применению технологии газодинамического воздействия и модифицирования на свойства отливок из сплава АК5М, затвердевающих в кокиле, удалось измельчить и сфероидизировать железосодержащие фазы, повысить уровень механических свойств на 15–20 %, сократить на 28 % количество брака отливок по рыхлотам и газовым раковинам.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Мондольфо; пер. с англ. – М. : Металлургия, 1979. – 640 с.
2. Ларионов Г. В. Вторичный алюминий / Г. В. Ларионов. – М. : Металлургия, 1967. – 271 с.
3. Немененок Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Б. М. Немененок. – Мн. : Технопринт, 1999. – 272 с.
4. Возможность использования комплексного модификатора длительного действия на основе нанопорошков длительного действия для повышения качества отливок из алюминиевых сплавов : новые материалы и технологии в машиностроении // Сб. трудов IV Международной научно-технической конференции. – Брянск: БГИТА, 2005. – С. 17–23.
5. Селиверстов В. Ю. Технология газодинамического воздействия на расплав в литейной форме – один из перспективных способов повышения качества металла отливок / В. Ю. Селиверстов // Сучасні проблеми металургії : наукові праці. – Днепропетровск : Системні технології. – 2007. – Том 10. – С. 25–35.
6. Селиверстов В. Ю. Перспективи применения комбинированных способов управления структурообразованием литого металла / В. Ю. Селиверстов, Ю. В. Доценко // Вісник ДДМА. – 2009. – № 1 (15). – С. 267–273.
7. Калиниченко А. С. Управляемое направленное затвердевание и лазерная обработка : теория и практика / А. С. Калиниченко, Г. В. Бергман. – Мн. : Технопринт, 2001. – 367 с.
8. Доценко Ю. В. Застосування перспективної комплексної технології для підвищення механічних властивостей литих виробів зі сплавів системи Al-Si / Ю. В. Доценко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 4/1 (34). – С. 27–29.