

2. Модифицирование кальцием неметаллических включений в марганцовистой стали, раскисленной алюминием / Б. Ф. Белов, Г. С. Ершов, Н. А. Овчинников и др. // Изв. АН СССР. Металлы. - 1984. - № 6. - С. 3-9.
3. *Новохатский И. А., Белов Б. Ф.* Фазовые равновесия и распределение элементов в системе Fe-O-Al // Изв. АН СССР. Металлы. - 1966. - № 1. - С. 38-48.
4. *Новохатский И. А., Белов Б. Ф.* Термодинамика распределения элементов при раскислении железа кремнием // Изв. вузов. Чер. металлургия. - 1967. - № 6. - С. 9-15.
5. *Торопов Н. А., Борзаковский В. П., Лапин В. В., Курцева Н. Н.* Диаграммы состояния силикатных систем. - М.; Л.: Наука, 1965. - 545 с.
6. *Перепелицын В. А.* Основы технической минералогии и петрографии. - М.: Недра, 1987. - 256 с.
7. *Жмойдин Г. И., Чаттерджи А. К.* Шлаки для рафинирования металла. - М.: Металлургия, 1986. - 296 с.
8. *Белов Б. Ф., Троцан А. И., Харлашин П. С.* Структуризация металлургических фаз в жидком и твердом состояниях // Изв. вузов. Чер. металлургия. - 2002. - № 4. - С. 70-75.
9. *Троцан А. И., Харлашин П. С., Белов Б. Ф.* О природе химической связи элементов в металлургических фазах // Там же. - 2002. - № 4. - С. 60-63.
10. Типонорфизм минералов: Справочник / Под ред. Л. В. Чернышевой. - М.: Недра, 1989. - 560 с.
11. *Вегман Е. Ф.* Симметрия кристаллов силикатов алюминатов, ферритов и титанатов – первых продуктов твердофазных реакций между оксидами // Изв.вузов. Чер. металлургия. - 1993. - № 9-10. - С. 11-15.
12. Исследование влияния способов внепечной обработки на загрязненность стали неметаллическими включениями / С. Г. Мельник, И. Л. Бродецкий, О. В. Носоченко и др. // Сталь. - 1996. - № 9. - С. 35-37.

Поступила 16.10.2008

УДК 621.746.6:669.715-41

Ф. М. Котлярский, В. И. Белик, Г. П. Борисов

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ СТРОНЦИЯ НА СВОЙСТВА НАВОДОРОЖЕННОГО СИЛУМИНА АК9

Приведены и рассмотрены результаты экспериментальных исследований влияния стронция (0,1 %) на пористость и механические свойства наводороженного вторичного силумина АК9 в зависимости от содержания оксидных включений и выдержки после наводороживания. Полученные результаты могут быть использованы в практике литья алюминиевых сплавов с повышенной загрязненностью водородом и Al_2O_3 .

Наведено та розглянуто результати експериментальних досліджень впливу стронцію (0,1 %) на пористість та механічні властивості наводненого вторинного силуміну АК9 в залежності від вмісту оксидних включень та витримки після наводнення. Одержані результати можуть бути використані в практиці лиття алюмінієвих сплавів з підвищеним забрудненням воднем та Al_2O_3 .

The results of experimental investigation of strontium influence (0,1%) on posity and mechanical properties of hydrogenizes secondary silumin AK9 in dependence of oxide inclusions content and aging after hydrogenization are shown and considered. The obtained results will be used during casing the aluminum alloys with high contamination with hydrogen and Al_2O_3 .

Ключевые слова: стронций, пористость, наводороживание, рафинирование, модифицирование.

Компенсация усадки затвердевающей отливки рассредоточенной дисперсной газовой (водородной) фазой – основополагающая идея разработки технологии безсадочного литья алюминиевых сплавов [1]. При этом важно, чтобы эта компенсация была практически полной, а образующаяся газовая пористость более-менее равномерной. Сочетать эти условия непросто, так как при высокой степени наводороживания расплава, необходимой для создания требуемого объема газовой фазы, в процессе снятия перегрева и начальной стадии затвердевания отливки (до образования связанного кристаллического каркаса) происходит всплытие образующихся пузырьков в верхнюю часть, что может стать причиной брака. В то же время известно, что при модифицировании силуминов стронцием, с одной стороны, происходит усиление газовой пористости в отливках [2-4], с другой, этот модификатор препятствует образованию пузырьков при снятии перегрева, но значительно повышает пористость в процессе кристаллизации сплава [5], а с третьей, повышение механических свойств металла за счет модифицированной структуры в какой-то мере компенсирует отрицательную роль пористости. Поскольку такого рода информация касается сплавов с обычным содержанием водорода, в данной работе ставилась задача исследовать влияние стронция на пористость и механические свойства наводороженного силумина АК9 (10 % Si+0,43 % Fe+0,34 % Mg+0,32 % Mn+0,014 % Ti). Наводороживание расплава (НР) осуществляли путем 3-минутной обработки влажным асбестом. Регулируемыми параметрами были время выдержки после НР и содержание Al_2O_3 . Последнее изменялось путем введения в расплав около 15 % силуминовой стружки.

В качестве шихты для приготовления стронциевой лигатуры (Al+12 % Si+10 % Sr) использовали порезанные отливки из наводороженного силумина.

Масса одной плавки в чугунном тигле электропечи составляла 12-14 кг. Лигатуру в виде прутков сечением $\sim 30 \times 30$ мм вводили из расчета 0,1 % Sr. Величину и распределение водородной пористости исследовали на разработанной авторами технологической пробе [6], представленной на рис. 1. Из верхней, средней и нижней частей пробы вырезали пластины толщиной 12 мм и определяли их плотность путем гидростатического взвешивания. Для определения временного сопротивления разрыву (σ_B) и относительного удлинения (δ) образцы (по 2 штуки) с диаметром разрывной части 8 мм вытачивали из брусков сечением 15x15 мм и длиной 80 мм, получаемых заливкой расплава в массивные чугунные кокили с исходной температурой 25-30 °С и нормально питаемых при затвердевании по всей длине верхней прибьюлю.

Полученные результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1. Как видно, при малой выдержке (4-6 мин) после наводороживания расплава модифицирование стронцием практически не повлияло на величину и характер распределения водородной пористости по высоте технологической пробы. Тем не менее, прочность увеличилась: без модифицирования на 9,5 % (по-видимому, за счет водородного рафинирования), а с модифицированием - на 20,8 %. Соответственно пластичность в первом случае практически не изменилась, а во втором повысилась на 59,6 %. Добавка в расплав стружки произвела заметные изме-

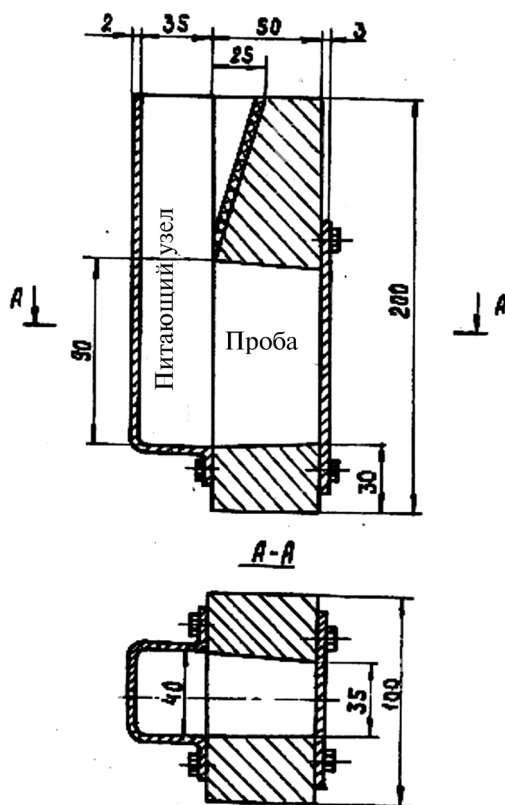


Рис. 1. Металлическая форма технологической пробы

Таблица 1. Влияние видов обработки расплава на свойства вторичного сплава АК9

Свойства сплава		Виды обработки расплава									
		1*	2*	3*	4*	1**	2**	3**	4**	4***	без обработки
Пористость технологической пробы, %	верх	4,47	5,8	11,21	7,0	1,95	1,55	5,92	3,08	0,71	0,78
	середина	2,67	2,77	2,21	2,5	2,03	2,14	2,15	1,96	1,28	0,9
	низ	1,45	1,72	1,26	1,26	0,99	0,99	1,14	0,94	0,45	0,62
Пористость заготовки на механические свойства, %		1,43	1,75	1,48	1,09	0,77	0,63	0,98	0,69	0,1	0,63
$\sigma_{\text{в}}$, МПа		195	215	205	214	195	240	192,5	220	230	178
δ , %		4,5	7,5	3,6	4,1	4,0	11,2	4,0	6,0	5,2	4,7

Виды обработки: 1 – наводороживание расплава (НР) при температуре 740–750 °С; 2 – НР + модифицирование стружкой (0,1 %); 3 – введение стружки (~15 %) + НР; 4 – введение стружки + НР + модифицирование стружками; * – выдержка после НР 4–6 мин; ** – выдержка после НР 36–38 мин; *** – выдержка после НР 80 мин

нения. Во-первых, резко усилилось всплывание водородных пузырьков в верхнюю часть пробы, особенно после наводороживания без модифицирования (более чем в 2 раза), тогда как с модифицированием этот показатель возрос на 20,7 %. Во-вторых, без модифицирования прочность возросла более значительно (на 15,2 %), а с модифицированием ее прирост практически не изменился. В-третьих, пластичность снизилась как без модифицирования (на 23,4 %), так и после модифицирования (на 12,8 %), но в последнем случае почти в 2 раза меньше.

Увеличение выдержки после наводороживания расплава до 36–38 мин также привело к существенным изменениям. При общем снижении пористости наиболее контрастно уменьшение всплывающей пористости в пробах из расплава с исходным содержанием твердых неметаллических включений: без модифицирования – в 2,3 раза, с модифицированием – в 3,7. В этом случае модифицирование оказалось очень эффективным и в плане повышения механических свойств: по сравнению с исходным необработанным расплавом прочность возросла на 34,8 %, а пластичность – в 2,4 раза. В то же время без модифицирования рост прочности оказался на том же уровне, что и после выдержки 4–6 мин, а пластичность даже несколько снизилась. Для сплава с добавкой стружки при аналогичном увеличении выдержки после НР наиболее заметно замедление снижения всплывающей пористости: без модифицирования - в 1,9 раза, а с модифицированием - в 2,3 раза. Что же касается механических свойств, то по сравнению с кратковременной выдержкой в случае без модифицирования прочность снизилась на 6,1 % (это, несмотря на снижение пористости на всех участках), а пластичность несколько повысилась (на 10 %); в случае с модифицированием увеличились и прочность (на 2,8 %), и пластичность (на 46 %). Дальнейшее увеличение выдержки до 80 мин привело к резкому падению пористости (особенно всплывающей и в заготовках на механические свойства), а также некоторому повышению прочности при небольшом падении пластичности.

Известно [7], что травление и механическая очистка поверхности исходных шихтовых материалов приводят к значительному снижению газосодержания расплава без рафинирования от оксидов и газа, то есть к изменению взаимодействия расплава с водородом (парами воды), несмотря на то, что внутри шихтовых материалов (чушек, отливок, стружки) также имеются оксиды. Из этого следует, что оксиды Al_2O_3 на поверхности и внутри отливки существенно отличаются по активности к порообразованию. Известно также [8], что контактное действие нерастворимых примесей на металл изменяется после того, как они некоторое время находились в твердой фазе, вращая в нее при кристаллизации ра-

сплава. В связи с этим представляет интерес вопрос о влиянии наводороживания и модифицирования стронцием на свойства того же сплава АК9, повторно переплавленного после введения стружки и НР. Полученные данные представлены в табл. 2. Если эти данные сравнивать с соответствующими данными табл. 1, относящимися к сплаву после введения стружки, то видно, что после кратковременной выдержки (4-6 мин) картина распределения пористости изменилась несущественно. Мало изменились и механические свойства после модифицирования. А вот после одного наводороживания заметно снизилась прочность (~5 %) при некотором улучшении пластичности (~17 %).

Более существенные изменения произошли после выдержки 36-38 мин. Для немодифицированного сплава следует отметить небольшое снижение всплывающей пористости (было 9,98 %, стало 7,48 %) и существенное падение механических свойств: прочности на 11,5 % и пластичности на - 14,3 %. Зато после модифицирования пористость резко снизилась, особенно всплывающая (в 5,8 раза) и в заготовке на механические свойства (в 9,4 раза), а прочность увеличилась на 15,5 % и достигла максимального значения в рамках выполненных исследований (242,5 МПа) при практически неизменной пластичности.

Судя по данным табл. 1 и 2, нет оснований утверждать, что стронций способствует повышению пористости отливок из наводороженных сплавов, особенно с повышенным содержанием оксидов Al_2O_3 . Этот модификатор не устраняет всплывающей пористости, хотя в большинстве случаев существенно уменьшает ее.

Анализ полученных данных приводит к однозначному выводу о том, что стронций во время выдержки после наводороживания расплава ускоряет снижение пористости в отливках (технологической пробе, заготовке на механические свойства). Это наглядно подтверждается данными табл. 3 и 4, в которых отражено отношение значений пористости после выдержки 4-6 мин к значениям пористости на тех же участках после выдержки 36-38 мин. Практически во всех случаях это отношение больше после модифицирования, причем для многих случаев очень значительно. Получается, что по отношению к наводороженным силуминам стронций выполняет рафинирующие функции (возможно, через воздействие на оксидные включения и поверхностную пленку). Кинетика этого процесса для различных участков экспериментальных отливок представлена на рис. 2. Как видно, всплывающая пористость (кривая 1) снижается с несколько

Таблица 2. Влияние видов обработки расплава на свойства вторичного сплава АК9, повторно переплавленного после введения стружки и НР

Свойства сплава		Виды обработки расплава			
		1*	1**	2*	2**
Пористость технологической пробы, %	верх	9,98	7,48	5,14	0,89
	середина	1,92	2,19	2,52	1,79
	низ	1,4	1,38	1,26	0,64
Пористость заготовки на механические свойства, %		1,28	1,21	1,41	0,15
σ_v , МПа		195	172,5	210	242,5
δ , %		4,2	3,6	5,7	5,2

Виды обработки: 1 - наводороживание расплава (НР); 2 - НР+модифицирование стронцием; * - выдержка после НР 4-6 мин; ** - выдержка после НР 36-38 мин

Таблица 3. Влияние видов обработки расплава на снижение (%) пористости сплава АК9 при увеличении выдержки после НР с 4-6 до 36-38 мин

Объект исследования		Виды обработки расплава*			
		1	2	3	4
Технологическая проба	верх	56,4	73,3	47,2	56
	середина	24,0	22,7	2,7	21,6
	низ	31,7	42,4	9,5	25,4
Заготовка на механические свойства		46,2	64	33,8	36,7

* согласно табл. 1.

Таблица 4. Влияние видов обработки расплава на снижение (%) пористости сплава АК9 (повторно переплавленного после введения стружки и НР) при увеличении выдержки после НР с 4-6 до 36-38 мин

Объект исследования		Виды обработки расплава*	
		1	2
Технологическая проба	верх	25,1	82,7
	середина	-14,1	29,0
	низ	1,4	49,2
Заготовка на механические свойства		5,5	89,4

* согласно табл. 1.

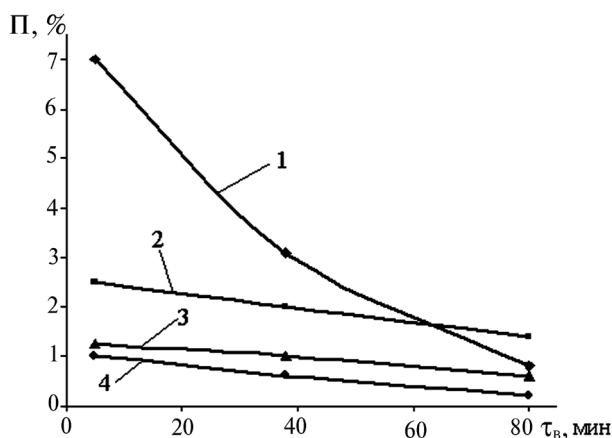


Рис. 2. Влияние выдержки (τ_v) после НР на изменение пористости (П) в технологической пробе (1 - верх, 2 - середина, 3 - низ) и в заготовке на механические свойства (4) для сплава АК9 после введения стружки, НР и модифицирования стронцием

образом, и в данном эксперименте увеличение выдержки после НР благоприятно влияет на формирование отливки. Тем не менее, во всех трех случаях вырезанные из центральной

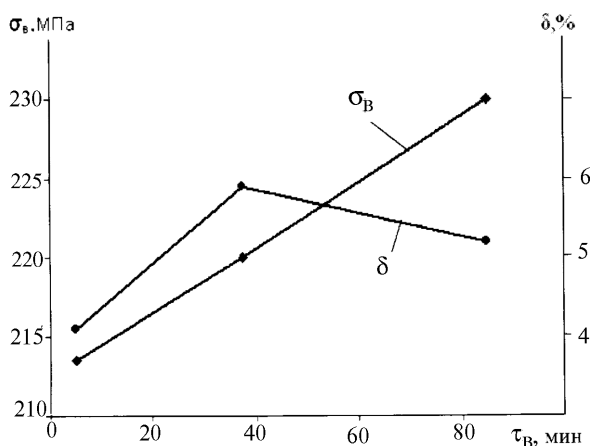


Рис. 3. Влияние выдержки (τ_v) после НР на изменение прочности (σ_v) и пластичности (δ) сплава АК9 после введения стружки, НР и модифицирования стронцием

убывающим темпом, тогда как междендритная (кривые 2-4) – практически прямолинейно. Примерно по такому же закону увеличивается прочность (рис. 3) и, судя по графикам этих рисунков, ресурс выдержки не ограничивается 80 мин.

Комплексное влияние стружки, наводороживания и модифицирования на формирование отливки в условиях недостаточного питания исследовали на технологической пробе, в которой отливка диаметром 90 мм сообщалась с прибылью питателем диаметром 32 мм (рис. 4). Расплав при температуре 730-750 °С заливали в кокиль с исходной температурой 25-30 °С. После выдержки 4-6 мин с момента окончания НР (рис. 4, а) наряду с рассредоточенной мелкой пористостью в поле шлифа в верхней части отливки отчетливо видна зона всплывших пузырьков различных размеров (максимум 2 мм). При увеличении выдержки до 36-38 мин (рис. 4, б) также заметно скопление пузырьков в верхней части, хотя количество крупных пор сократилось. Через 80 мин выдержки (рис. 4, в) осталась только мелкая пористость на участке, затвердевшем после прекращения питания прибылью. Таким

образом, и в данном эксперименте увеличение выдержки после НР благоприятно влияет на формирование отливки. Тем не менее, во всех трех случаях вырезанные из центральной части отливки пластинки толщиной 5 мм не выдержали испытаний на герметичность под давлением сжатого воздуха 0,5 МПа.

В заключение следует признать, что полученные результаты исследований, к сожалению, опровергают положительную роль стронция в технологии беззасадочного литья. Была предпринята попытка исправить положение за счет снижения интенсивности затвердевания сплава. Форму технологической пробы (см. рис. 1) перед заливкой разогревали в печи сопротивления до 420-430 °С. Исходили из того, что в этих условиях сплошной кристалличес-

кий каркас в незатвердевшем объеме отливки образуется при меньшей затвердевшей массе сплава, чем в холодном кокиле, что и будет препятствовать всплыванию водородных пузырьков, образующихся при кристаллизации оставшегося расплава. Использовали остатки того же сплава АК9 с добавками стружки и стронция. При температуре 740-750 °С расплав перед заливкой на протяжении 3-х минут обрабатывали влажным асбестовым тампоном, а затем выдерживали 4 мин. После заливки расплава в кокиль при комнатной температуре пористость верхней, средней и нижней частей пробы составила соответственно 10,8; 0,8 и 0,25 %. Для горячего кокиля соответственно 5,9; 2,3 и 2,0 %. Действительно, произошло значительное снижение всплывающей пористости (верхняя часть пробы), но значения междритной пористости (середина и низ), хотя и в несколько раз выше, чем при литье в холодный кокиль, далеки до величины усадки затвердевающей отливки (~ 4 %).

Тем не менее, в настоящей работе раскрылись новые аспекты водородного рафинирования в комплексе с модифицированием стронцием, что может быть использовано в практике литья вторичных алюминиевых сплавов, особенно с повышенным содержанием водорода и оксидных включений. Дальнейшие исследования по оптимизации режимов такой обработки позволят усилить положительный эффект.



Список литературы

1. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П. Малоотходное литье алюминиевых сплавов. - Киев: Наук. думка, 2007. - 158 с.
2. Argo D., Gruzleski J. E. Porosity in modified aluminum alloy castings // Trans Amer., Foundrymen's Soc. Vol. 96. Proc. 92 nd Annu. Meet., Anr. 24-28, 1988. - Des Plaines (Ill.), 1988. - P. 65-74.
3. Задруцкий С. П., Немененок Б. М., Королев С. П., Бестужев Н. И., Михайловский В. М. Рафинирование и модифицирование алюминиевых сплавов // Литейн. пр-во. - 2004. - № 3. - С. 17-20.
4. Влияние стронция на пористость отливок из силуминов // Modern Casting. - 1995. - V. 85, № 3. - P. 46-47.
5. Худокормов Д. Н., Дегтярев Р. В., /Задруцкий С. П. Дегазация расплава силумина // Литейн. пр-во. - 1998. - № 5. - С. 14-15.
6. Котлярский Ф. М., Белик В. И. Предпосылки совершенствования технологической пробы для оценки газонасыщенности жидких алюминиевых сплавов // Процессы литья. - 2009. - № 1. - С. 17-27.
7. Иванов В. П., Спаский А. Г. Влияние окислов алюминия на процессы газонасыщения и газовойделения в алюминии и его сплавах // Литейн. пр-во. - 1963. - № 1. - С. 26-28.
8. Данилов В. И. Строение и кристаллизация жидкостей. - Киев: АН УССР, 1956. - 424 с.

Поступила 28.10.2008

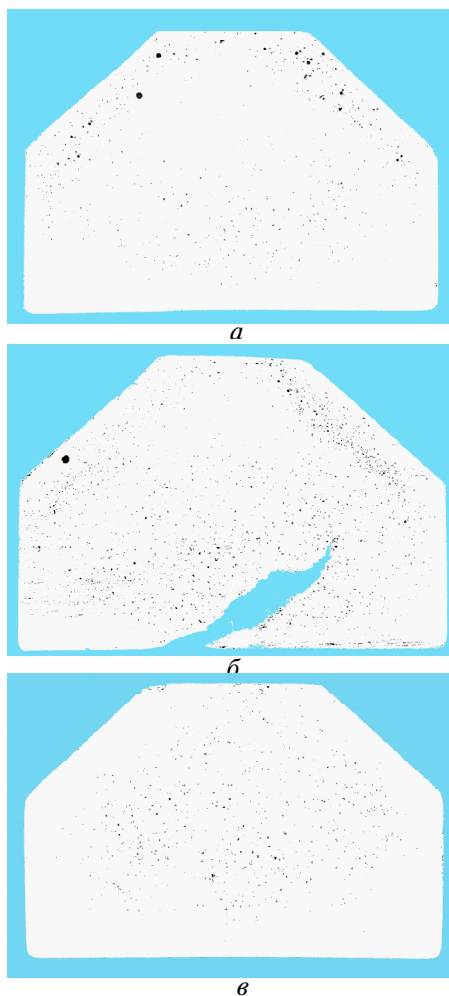


Рис. 4. Характер газовой пористости в непропитываемом узле в зависимости от выдержки после НР, в мин: а - 5; б - 37; в - 80