



УДК 669.187.58

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ТИПА В96

В. Е. Федорчук, Ф. К. Биктагиров

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлены данные о влиянии способа выплавки на однородность слитков сложнолегированного алюминиевого сплава В96 системы Al–Zn–Mg–Cu. Показано преимущество индукционных печей над печами сопротивления для производства алюминиевых сплавов, склонных к ликвационным расслоениям. Определено, что наибольшая чистота по неметаллическим включениям обеспечивается при барботировании алюминиевого расплава аргоном и фильтрации металла при разливке через керамические фильтры. Исследовано влияние модификатора структуры (скандия) на качество литых заготовок. Показано, что легирование сплава В96 0,25...0,35 мас. % скандия обеспечивает повышение показателей механических свойств металла и позволяет сократить или совсем исключить гомогенизирующий отжиг слитков перед последующей обработкой деформацией. Библиогр. 8, табл. 3, ил. 3

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы; индукционная плавка; цинк; магний; медь; ликвация; скандий; модифицирование*

Алюминиевые сплавы являются перспективными конструкционными материалами, используемыми в различных отраслях машиностроения. К одним из наиболее высокопрочных относятся сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu [1]. Их прочность после соответствующей упрочняющей термической обработки может достигать 650 МПа. Эти сплавы хорошо обрабатываются давлением и используются для изготовления силовых элементов летательных аппаратов (лонжероны, стрингеры, шпангоуты, нервюры, нижняя обшивка крыла) [2, 3].

Основная масса алюминиевых сплавов изготавливается в пламенных печах, однако для сплавов расматриваемой системы такая технология не является оптимальной главным образом из-за интенсивного выгорания в печной атмосфере магния и цинка. Лучшей в этом плане является плавка в печах со-

противления или индукционных, где выгорание элементов не столь значительно [4].

Для оценки влияния способа плавки на качество слитков алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu использовали сплав марки В96, химический состав которого приведен в табл. 1. Выплавку этого сплава осуществляли в индукционной печи и печи электросопротивления с графитовыми тиглями вместимостью 30 кг алюминия с разливкой металла в стальной водоохлаждаемый кристаллизатор (кокиль) диаметром 150 мм.

В качестве шихтовых материалов применяли чушковый алюминий марки А99, электролитическую медь марки М1, лигатурные сплавы Al–5 % Zr, Al–5 % Mn, чушковый магний марки Мг1 и цинк марки Ц1. Для лучшего усвоения легирующих добавляли определенную последовательность загруз-

Таблица 1. Химический состав сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu, мас. %

Марка сплава	Zn	Mg	Cu	Mn	Zr	Sc
В96	8,4...8,6	2,5...2,7	2,2...2,4	0,20...0,30	0,15...0,25	–
В96Sc	8,4...8,6	2,5...2,7	2,2...2,4	0,20...0,30	0,15...0,25	0,25...0,35

Примечание. Содержание железа и кремния составляет не более 0,1 мас. %.



ки шихтовых материалов в печь и температурный режим плавки. Первоначально в печи расплавливали алюминий и при его перегреве до температуры 740 °С в расплав вводили медь и лигатуры, содержащие цирконий и марганец. Затем в расплав добавляли цинк и далее магний. Для обеспечения минимального угара магний вводили под зеркало расплава в специальной дырчатой коробке.

После окончания присадки всех легирующих компонентов и их полного растворения расплав продували (барботировали) аргоном через погружаемую в жидкий металл кварцевую трубку с контролем расхода газа. Затем металл выдерживали в печи до достижения температуры разлива 680...700 °С. В процессе перелива из печи в кокиль осуществлялась фильтрация расплава через сотовые керамические фильтры.

С полученных слитков на различных уровнях по высоте (донной, средней и головной) вырезали поперечные темплеты. Из них отбирали образцы для химического анализа и металлографических исследований. Степень чистоты слитков по неметаллическим включениям и оксидным пленкам определяли по пробе Добаткина [5].

Перед обработкой давлением (прокаткой) для получения плоских, а также экструзией для получения круглых заготовок поверхность слитков подвергали механической обдирке на глубину 4...6 мм, затем удаляли головную часть с усадочной раковиной. Внешний вид слитков сплава В96 после извлечения из кокиля и механической подготовки к последующей деформации показан на рис. 1.

Как следует из табл. 2, распределение легирующих элементов в слитке, полученном после плавки в печи электросопротивления, отличается большей неоднородностью по высоте. Особенно это заметно по содержанию меди, цинка и магния, количество которых в верхней части слитков выше, чем в донной.

Такое распределение легирующих объясняется тем, что при плавке в печи электросопротивления присаживаемые в алюминий тяжелые металлы осаждаются на дно тигля, где образуется расплав с их

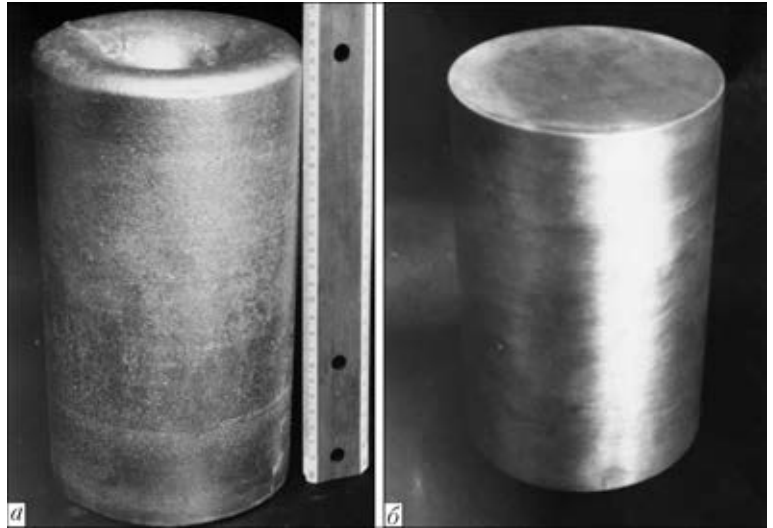


Рис. 1. Внешний вид слитков после литья (а) и механической обработки (б)

большой концентрацией. Продувка металла аргоном ввиду его небольшой интенсивности с целью исключения вовлечения поверхностной оксидной пленки внутрь металлической ванны не позволяет полностью усреднить химический состав алюминиевого сплава. Впоследствии при разливе металла обогащенный цинком и медью расплав поступает в форму последним, т. е. в головную часть слитка. Что касается магния, то ввиду его окисления на зеркале металла в процессе плавки первые, поступающие в донную часть слитка порции металла, обеднены им.

При плавке в индукционной печи из-за интенсивного перемешивания расплава в тигле под действием электромагнитных полей, возбуждаемых индуктором, металл становится однороднее по составу, т. е. более равномерно распределяются легирующие элементы в слитке.

Гомогенизация слитков при температуре 460 °С на протяжении 16 ч привела к частичному устранению химической неоднородности (табл. 3). Увеличение времени выдержки до 24 ч при гомогенизации существенных улучшений с точки зрения равномерности состава не дало.

Высокое качество алюминиевых сплавов зависит не только от равномерности химического состава, но и от чистоты металла по неметаллическим вклю-

Таблица 2. Химический состав металла в различных зонах слитков, мас. %

Элемент	Плавка в печи электросопротивления			Плавка в индукционной печи		
	Верх	Середина	Низ	Верх	Середина	Низ
Zn	9,56	8,65	7,53	8,58	8,51	8,50
Mg	2,43	2,22	2,16	2,48	2,51	2,54
Cu	2,41	2,13	1,92	2,34	2,32	2,25
Mn	0,33	0,30	0,26	0,30	0,29	0,30
Zr	0,16	0,15	0,14	0,16	0,16	0,16

Примечание. Здесь и в табл. 3 приведен усредненный состав элементов по результатам пяти измерений.



Таблица 3. Химический состав металла слитков сплава В96 после гомогенизации при температуре 460 °С на протяжении 16 ч

Элемент	Массовая доля элементов в различных зонах слитков					
	Плавка в печи электросопротивления			Плавка в индукционной печи		
	Верх	Середина	Низ	Верх	Середина	Низ
Zn	9,33	8,51	7,77	8,51	8,48	8,52
Mg	2,32	2,28	2,25	2,50	2,51	2,49
Cu	2,19	2,15	2,17	2,26	2,24	2,25
Mn	0,29	0,29	0,28	0,27	0,26	0,28
Zr	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16

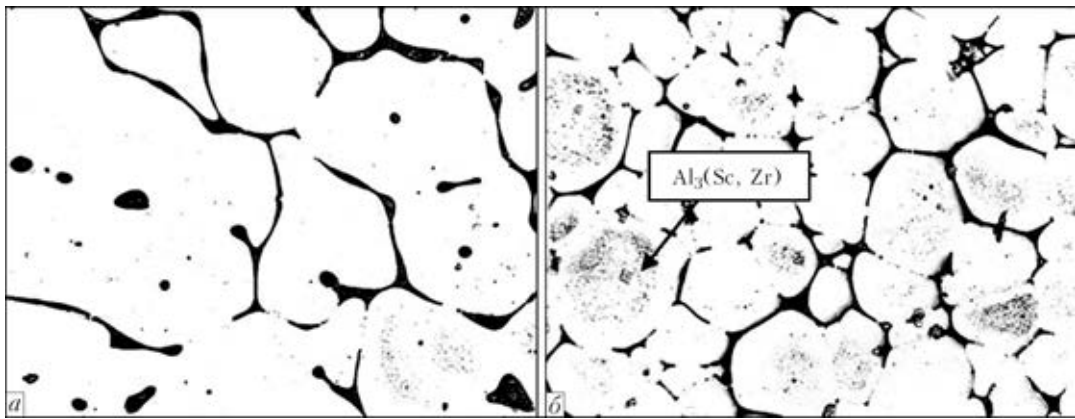


Рис. 2. Микроструктуры (×500) литого металла сплавов В96 (а) и В96Sc (б)

чениям и оксидным пленкам [6]. Для определения необходимого минимума мер для получения качественных слитков проводили три варианта плавки: без продувки аргоном в печи; с фильтрацией расплава через керамический фильтр; с продувкой аргоном и с фильтрацией через керамический фильтр. При отсутствии какой-либо обработки расплава площадь неметаллических включений по пробе До-

баткина составила 10 %. Разливка с фильтрацией через керамический фильтр дала возможность уменьшить площадь неметаллических включений до 1,2 %. Сочетание продувки аргоном и фильтрации позволило достичь довольно высокой чистоты слитков по неметаллическим включениям — их площадь не превышала 0,1 %. Таким образом, для получения металла с низким содержанием неметаллических включений и оксидных пленок необходимо применение как фильтрации, так и продувки аргоном.

Повышения качества алюминиевых сплавов, особенно сложнoleгированных и склонных к ликвации, можно достичь путем их микролегирувания элементами, обеспечивающими измельчение структуры. С середины XX века в металлургию алюминия прочно вошел такой легирующий элемент, как скандий. Он оказался настолько сильным модификатором структуры, что были разработаны целые серии сплавов, содержащие скандий [7]. Положительное влияние скандия на свойства сплавов алюминия носит комплексный характер. Его добавки не только повышают предел текучести и временное сопротивление, но и улучшают обрабатываемость сплава, его технологическую пластичность, позволяют уменьшить размер зерен в литом состоянии, резко повышают температуру рекристаллизации в связи с закреплением субграниц дисперсными частицами второй фазы [8]. Для изучения влияния скандия на свойства сплава В96 дополнительно получены слитки с легируванием металла этим элемен-

HV , МПа ($P = 20$ г)

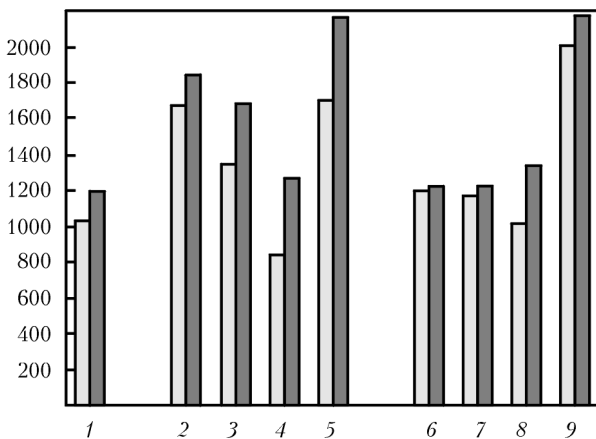


Рис. 3. Микротвердость литого металла сплавов В96 (□) и В96Sc (■) после различных режимов термической обработки: 1 — непосредственно после литья; 2 — естественного старения (170 сут); 3 — искусственного старения (120 °С, 16 ч); 4 — отжига (310 °С, 1 ч); 5 — закалки (460 °С, в воду) и искусственного старения (120 °С, 16 ч); 6 — гомогенизации (460 °С, 16 ч) и естественного старения (170 сут); 7 — гомогенизации и искусственного старения; 8 — гомогенизации и отжига; 9 — гомогенизации, закалки и искусственного старения



том. Плавки проводили в индукционной печи, а скандий вводили в алюминиевый расплав в виде лигатуры Al-2 % Sc с обеспечением его содержания в пределах, указанных в табл. 1.

Согласно данным металлографических исследований микроструктура литого металла сплава В96 характеризуется наличием α -твердого раствора, фаз $\eta(\text{Mg}(\text{CuZn})_2)$, $\text{T}(\text{ZnMgAlCu})$ и эвтектических выделений по границам кристаллов. В сплавах, легированных скандием, кроме того, присутствуют интерметаллиды $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ размером 3...7 мкм. Поэтому введение скандия в сплав способствовало измельчению кристаллической структуры в 3...5 раз. Средний размер зерна уменьшился от 120...240 в сплаве без скандия до 30...50 мкм в сплаве со скандием (рис. 2).

Подтверждением положительного влияния скандия на свойства металла служат данные исследования на микротвердость сплавов В96 и В96Sc, представленные на рис. 3. Согласно им микротвердость литого металла в сплаве со скандием (В96Sc) при всех видах термической обработки превышает таковую в сплавах без скандия (В96). Следует отметить, что для сплава со скандием гомогенизация не дала существенного прироста микротвердости, что свидетельствует о довольно равномерном распределении легирующих элементов в слитке.

Выводы

1. Установлено, что использование индукционных печей для выплавки сложнолегированных алюминиевых сплавов позволяет получать слитки с равно-

мерным распределением легирующих элементов по сечению слитков.

2. Показано, что максимальная чистота металла по оксидным пленкам и неметаллическим включениям достигается при применении продувки расплава аргоном и фильтрации его в процессе разлива через керамические фильтры.

3. Определено, что введение скандия в сплав В96 способствует измельчению кристаллической структуры, повышению механических свойств металла и позволяет сократить или совсем исключить гомогенизирующий отжиг слитков перед последующим переделом.

1. Фридляндер И. Н. Изыскание высокопрочных деформируемых алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu // Легкие сплавы. Металловедение, термическая обработка, литье и обработка давлением. — М.: АН СССР, 1958. — С. 49-85.
2. Кривов Г. А. Технология самолетостроительного производства. — Киев: КВИЦ, 1997. — 460 с.
3. Ищенко А. Я., Лабур Т. М. Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов. — Киев: Наук. думка, 2013. — 416 с.
4. Альтман М. Б., Лебедева А. А., Чухров М. В. Плавка и литье легких сплавов. — М.: Металлургия, 1969. — 680 с.
5. Избранные труды В. И. Добаткина / Под ред. В. И. Елагина. — М.: ВИЛС, 2001. — 668 с.
6. Курдюмов А. В., Пикунев М. В., Чурсин В. М. Литейное производство цветных и редких металлов. — М.: Металлургия, 1982. — 352 с.
7. Ищенко А. Я., Лабур Т. М. Свариваемые алюминиевые сплавы со скандием. — Киев: КВИЦ, 1999. — 116 с.
8. Мильман Ю. В., Лоцко Д. В., Сирко А. И. Скандиевый эффект повышения прочности алюминиевых сплавов // Сб. науч. тр. III Междунар. семинара «Современные проблемы прочности» (Старая Русса, окт. 1999 г.). — Старая Русса, 1999. — С. 277-283.

Data on the influence of melting process on homogeneity of ingots of complex aluminium alloy V96 of Al-Zn-Mg-Cu system are presented. The advantage of induction furnaces over resistance furnaces for production of aluminium alloy prone to liquation delaminations is shown. It is determined that the highest purity as to nonmetallic inclusions is ensured at aluminium melt sparging by argon and metal filtering through ceramic filters during pouring. Influence of structure modifier (scandium) on cast billet quality was studied. It is shown that alloying of V96 alloy by 0.25...0.35 wt.% scandium ensures an improvement of metal mechanical property values and allows reducing or completely eliminating the homogenizing annealing of ingots before subsequent forming. 8 Ref., 3 Tables, 3 Figures.

Keywords: aluminium alloys; induction melting; zinc; magnesium; copper; liquation; scandium; modifying

Поступила 19.03.2014

САМЫЙ ЧЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ В МИРЕ



«Vantablack» — это название покрытия из материала, являющегося самым черным на сегодняшний день. Этот материал, разработанный и изготовленный специалистами британской компании Surrey Nanosystems, имеет довольно малую плотность, он характеризуется устойчивостью против воздействия высоких и низких температур, коэффициент поглощения света этого материала составляет рекордные 99,96 %. Благодаря указанным свойствам он является идеальным для использования в оптических системах современных телескопов, экранах, системах тепловой защиты и в качестве покрытия миниатюрных узлов и элементов различных микроэлектромеханических устройств.

<http://www.dailytechinfo.org/nanotech>