

**В. П. Гаврилюк, А. А. Кулинич\*, Е. А. Рябинина**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

## **ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АМг6л ПОСЛЕ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ**

*Исследовано влияние примесей кремния (содержанием до 2 %) на фазово-структурный состав сплава АМг6л после литья в кокиль. Построены аналитические зависимости уровня механических свойств сплава АМг6л от содержания в нем магния и кремния.*

**Ключевые слова:** сплав АМг6л, кристаллизация, кремний, фазовый состав, структура, механические свойства.

*Досліджено вплив домішок кремнію (вмістом до 2 %) на фазово-структурний склад промислового сплаву АМг6л після лиття в кокиль. Побудовано аналітичні залежності рівня механічних властивостей сплаву АМг6л від вмісту в ньому магнію і кремнію.*

**Ключові слова:** сплав АМг6л, кристалізація, кремній, фазовий склад, структура, механічні властивості.

*Influencing of admixtures of silicon is investigational (by maintenance to 2 %) on phase-structural composition of alloy of АМг6л after casting in metallic form. The mathematical models of dependence of level of mechanical properties of alloy of АМг6л are built depending on maintenance in him of magnesium and silicon.*

**Keywords:** alloy АМг6л, crystallization, silicon, phase composition, structure, mechanical properties.

Литейные сплавы системы Al-Mg относятся к группе коррозионностойких сплавов, которые используются для производства литых и сварных конструкций, работающих в различных климатических условиях [1-3]. Данные сплавы характеризуются хорошим сочетанием механических и технологических свойств, используются в судостроении, авиационной и других отраслях промышленности.

Главной вредной примесью для данной группы сплавов, снижающей уровень механических свойств, является кремний. Однако, следует отметить, что добавки кремния вводят в некоторые литейные сплавы системы Al-Mg (такие как АМг7, АМг11) для повышения технологических свойств. Типичным сплавом данной системы является сплав АМг6л, который используется как после литья, так и после термической обработки (отжиг и закалка). В соответствии с ДСТУ 2839-94 в сплаве АМг6л содержание кремния не должно превышать 0,2 %. Это ограничивает возможность использования для производства данного сплава технического алюминия, лома и отходов алюминиевых сплавов, что снизило бы себестоимость его производства. Для установления возможности получения из сплава АМг6л, содержащего повышенное количество примесей кремния, образцов с высоким уровнем механических свойств в данной работе исследовали влияние примесей кремния (содержанием до 2 %) на формирование фазового состава, структуры и уровень механических свойств данного сплава после литья в кокиль.

Химический состав исследуемого сплава изменяли в следующих пределах: Mg = 6-7 %, Si = 0,1-2,0 %. Содержание остальных компонентов поддерживали на постоянном уровне, в %: Zr = 0,15, Be = 0,05, Ti = 0,1.

Плавки проводили в лабораторной печи сопротивления в графитошамотном тигле, в котором расплавляли алюминий марки А99 и лигатуру Al-Be. После этого



0,03 до 2,0 % в сплаве АМгбл влияет на снижение температуры начала кристаллизации данного сплава ( $T_1$  – температура ликвидуса) на 18 °С, повышение температуры ( $T_2$ ) эвтектической реакции  $\alpha_{Al} + Mg_2Si$  – на 39 °С, снижение температуры ( $T_3$  – температура неравновесного солидуса) эвтектической реакции  $\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$  – на 3 °С.

**Таблица 3. Влияние кремния на фазовый состав и температуру фазовых превращений во время кристаллизации сплава АМгбл**

Si, %	Температура превращения, °С			Фазовый состав сплава
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	
0,03	622	542	450	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2)$
0,2	619	549	449	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$
0,5	616	552	448	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$
1,0	610	570	447	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$
1,5	607	577	447	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$
2,0	604	581	447	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$

При содержании 0,03 % Si в исследуемом сплаве интервал кристаллизации данного сплава составляет 172 °С, по мере увеличения содержания кремния интервал кристаллизации сплава АМгбл уменьшается и при содержании 2 % Si составляет 160 °С (табл. 3).

Согласно данным металлографического и микрорентгеноспектрального анализов, при содержании в сплаве АМгбл до 0,05 % Si кремнийсодержащие фазы не образуются. В концентрационном интервале 0,06–2,0 % Si в исследуемом сплаве появляется новая фаза –  $Mg_2Si$  (табл. 3).

Установлено, что при увеличении содержания кремния в сплаве АМгбл растет количество выделений частиц фазы  $Mg_2Si$  (рис. 2). Также наблюдается укрупнение размеров этих выделений и их разветвленность (рис. 3).

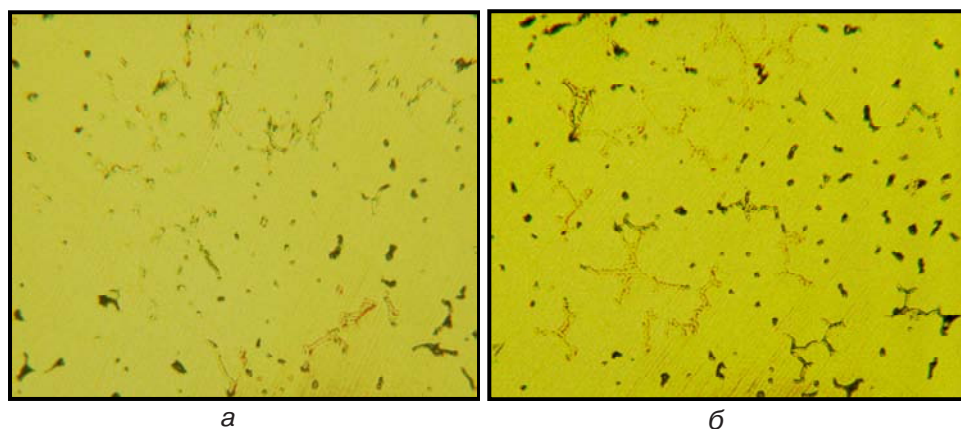
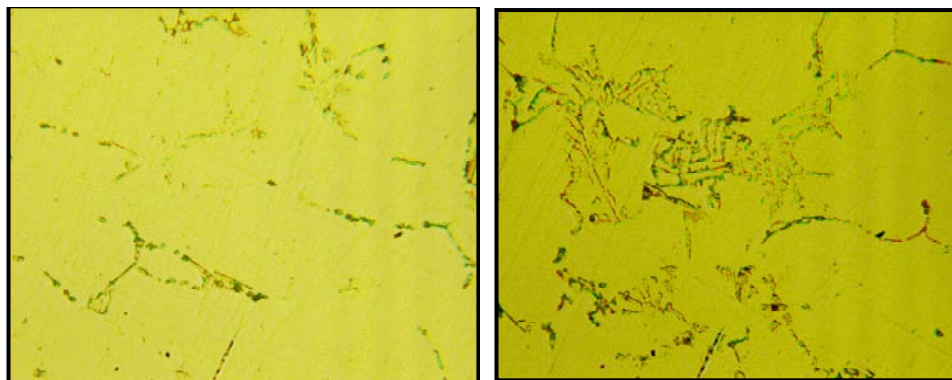


Рис. 2. Влияние кремния на микроструктуру сплава АМгбл после литья в кокиль: а – 0,5 % Si, б – 2 % Si, x100

На втором этапе исследований установлено влияние примесей кремния (содержанием до 2 %) на механические свойства сплава АМгбл после литья в кокиль. В сплаве АМгбл вместе с примесями кремния изменяли содержание магния от 6 до 7 % (данный концентрационный интервал отвечает требованиям государственного стандарта к содержанию магния в данном сплаве). Совместное влияние магния и кремния на механические свойства сплава АМгбл после литья в кокиль приведено в табл. 4.



а

б

Рис. 3. Влияние кремния на микроструктуру сплава АМГбл после литья в кокиль: а – 0,5 % Si, б - 2 % Si, x400

Анализируя данные, приведенные в табл. 4, можно сделать вывод, что при увеличении содержания магния в исследуемом сплаве с 6 до 7 % и при постоянном содержании кремния происходят незначительное повышение прочности сплава АМГбл и существенное снижение уровня пластичности. Это объясняется повышением легированности алюминиевого твердого раствора за счет увеличения количества растворенного в нем магния, а снижение пластичности исследуемого сплава с содержанием 7 % Mg – увеличением количества хрупкой β-фазы, которая выделяется по границам зерен.

При увеличении содержания примесей кремния в исследуемом сплаве до 0,5 % (при постоянном содержании магния) наблюдается незначительное снижение прочности и пластичности сплава. Последующее увеличение содержания кремния существенно снижает уровень механических свойств сплава АМГбл, особенно пластичность.

Снижение прочности сплава при увеличении содержания в нем кремния происходит за счет уменьшения содержания магния в алюминиевом твердом растворе (часть магния связывается в фазу Mg<sub>2</sub>Si), а существенное снижение пластичности можно объяснить увеличением количества фазы Mg<sub>2</sub>Si и ее размеров.

Для установления оптимального соотношения между содержанием магния и кремния в сплаве АМГбл, обеспечивающего повышенный уровень механических свойств сплава после литья в кокиль, с использованием метода наименьших квадратов были построены аналитические зависимости изменения уровня механических свойств исследуемого сплава от содержания в нем магния и кремния. Концентрационные интервалы изменения химического состава исследуемого сплава приведены в табл. 5.

Аналитические зависимости изменения механических свойств сплава АМГбл после литья в кокиль от содержания магния и кремния имеют следующий вид:

$$\sigma_{\lambda} = 230 - 7,2X_1 - 5,5X_2 + 11X_3 - 18,6X_1X_2 - 8,3X_1X_3 - 4X_2X_3, \text{ МПа};$$

**Таблица 4. Влияние магния и кремния на механические свойства сплава АМГбл после литья в кокиль**

Содержание компонентов, %мас.		Механические свойства	
Mg	Si	σ <sub>b</sub> , МПа	δ, %
6	0,1	225	6,8
6	0,5	221	6,4
6	1	210	4,4
6	1,5	204	3,4
6	2	193	2,7
6,5	0,1	230	6,5
6,5	0,5	224	6,0
6,5	1	219	4,3
6,5	1,5	214	3,3
6,5	2	205	2,5
7	0,1	234	6,3
7	0,5	227	5,7
7	1	220	3,6
7	1,5	215	2,9
7	2	211	2,2

$$\delta_{\text{л}} = 1,9 - 0,4X_1 - 0,4X_3 + 0,35X_2X_3, \%$$

**Таблица 5. Концентрационные интервалы изменения химического состава сплава АМгбл**

Концентрационный интервал изменения содержания легирующих компонентов	Mg, %	Si, %
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
Максимальное содержание в сплаве	7,0	2,0
Среднее содержание в сплаве	6,5	1,05
Минимальное содержание в сплаве	6,0	0,1

Применение метода многокритериальной оптимизации при анализе построенных моделей позволило установить оптимальное соотношение между содержанием магния и кремния в сплаве АМгбл, которое обеспечивает уровень механических свойств, соответствующий требованиям государственного стандарта к данному сплаву.

Поиск оптимального химического состава сплава АМгбл проводили при выполнении следующих условий:

- уровень механических свойств исследуемого сплава должен отвечать требованиям государственного стандарта к данному сплаву;
- с учетом того, что коррозионная стойкость исследуемого сплава возрастает при уменьшении содержания магния в сплаве, желательно искать оптимальный состав исследуемого сплава в области с минимальным содержанием магния, но в границах, которые допускает государственный стандарт для данного сплава;
- нужно установить оптимальный химический состав сплава с максимально высоким содержанием примесей кремния, это расширяет возможность использования технического алюминия, лома и отходов алюминиевых сплавов для производства сплава АМгбл, что будет способствовать снижению себестоимости производства сплава.

**Таблица 6. Оптимальный состав сплава АМгбл**

Марка сплава	Содержание компонентов, %мас.	
	Mg	Si
оптимальный состав сплава		
АМгбл	6,0 – 6,5	0,5
химический состав сплава (ДСТУ2839-94)		
АМгбл	6 – 7	до 0,2

При выполнении этих условий оптимальный состав сплава АМгбл, который используется после литья в кокиль, находится в границах, которые указаны в табл. 6. Достичь оптимального состава сплава АМгбл в производственных условиях можно путем подшихтовки при условии установления среднестатистического состава шихты на предприятии. Механические свойства исследуемого сплава с установленным опти-

мальным химическим составом приведены в табл. 7.

Согласно требованиям ДСТУ 2839-94, сплав АМгбл после литья в кокиль должен иметь уровень механических свойств не ниже, чем  $\sigma_b = 216$  МПа,  $\delta = 6$  %. Анализируя данные, полученные с помощью метода многокритериальной оптимизации, можно сделать вывод, что требованиям государственного стандарта к уровню механических

**Таблица 7. Механические свойства сплава АМгбл**

Марка сплава	Способ литья	Вид термической обработки	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
данные по ДСТУ 2839-94				
АМгбл	К	–	216	6
свойства сплава АМгбл оптимального состава				
АМгбл	К	–	217– 224	217– 224



свойств исследуемого сплава отвечают, в частности, сплавы, содержащие 6,0–6,5 % Mg до 0,5 % Si включительно.

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что для сплава АМгбл, который используется после литья в кокиль, можно повысить содержание примесей кремния с 0,2 до 0,5 % при сохранении уровня механических свойств сплава на уровне, регламентируемым государственным стандартом, при условии, что содержание магния в сплаве находится в пределах 6,0–6,5 %.



### Список литературы

1. Постников Н. С. Коррозионностойкие алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1976. – 303 с.
2. Машиностроение. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / Под ред. И. Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 2001. – Т. II. – 880 с.
3. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.

Поступила 05.10.2009

УДК 621.745.5:669.2/8

**В. С. Шумихин, А. Г. Потрух, Д. В. Спиридонов\*,  
В. В. Плитченко\*\***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*ОАО «Артемковский завод по обработке цветных металлов», Артемовск

\*\*Банкотно-монетный двор Национального банка Украины, Киев

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ, ЛИТЬЯ И ПРОКАТКИ СПЛАВА НА ОСНОВЕ МЕДИ С ЗАДАННОЙ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ

*Представлены технологические особенности процесса получения ленты из сплава на основе меди. Установлены температурные режимы плавки и прокатки с целью получения сплава с заданными свойствами, структурой и удельной электропроводностью.*

**Ключевые слова:** плавка, слитки, удлинение, удельная электропроводность, прокатка, лента.

*Представлено технологічні особливості процесу одержання стрічки із сплаву на основі міді. Встановлено температурні режими плавки і прокатки з метою одержання сплаву з заданими властивостями, структурою та питомою електропровідністю.*

**Ключові слова:** плавка, зливки, подовження, питома електропровідність, прокатка, стрічка.

*The technological features of process of obtaining of strip from an alloy on the basis of copper have*