

УДК 669.715

Н. Е. Калинина, Е. А. Джур, З. В. Вилищук, Т. В. Носова, В. А. Агапов

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара***ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СТРУКТУРЫ СПОСОБОМ
НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Вивчено мікроструктури алюмінієвого сплаву 01570 до та після модифікування. Проведено випробування механічних властивостей даного сплаву. Встановлено взаємозв'язок властивостей від структури матеріалу. Результати показали ефективність модифікування алюмінієвих сплавів системи Al–Mg карбідом кремнія.

Ключові слова: алюмінієві сплави, наномодифікатор, карбід кремнію.

Изучены микроструктуры алюминиевого сплава 01570 до и после модифицирования. Проведены испытания механических свойств данного сплава. Установлено взаимосвязь свойств от структуры материала. Результаты показали эффективность модифицирования алюминиевых сплавов системы Al–Mg карбидом кремния.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, наномодификатор, карбид кремния.

Microstructures of aluminum alloy 01570 before and after modification were studied. Testing of mechanical properties of the alloy was completed. A relation properties of the material structure is established. The results showed the effectiveness of the modification of aluminum alloys Al–Mg system with silicon carbide.

Key words: aluminium alloys, nanomodifiers, silicon carbide.

Введение. В напряженных конструкциях авиационной и ракетно-космической техники широкое распространение получили деформируемые алюминиевые сплавы систем Al–Mg, Al–Mg–Sc благодаря удачному сочетанию комплекса физико-механических свойств, технологичности и коррозионной стойкости.

Современные промышленные сплавы на алюминиевой основе имеют предел текучести $\sigma_{0,2}$ до 400 МПа, относительное удлинение δ до 15 %.

Основными путями повышения механических свойств алюминиевых сплавов являются: упрочнение твердого раствора, дисперсионное упрочнение, термо-механическая обработка, модифицирование.

Постановка задачи. Учитывая предъявляемые высокие требования к выпускаемой продукции авиакосмической промышленности, в данной работе были изучены алюминиевые сплавы системы Al–Mg, Al–Mg–Sc. Для получения отливок с высокими свойствами целесообразно применять модифицирование расплавов малыми добавками нанодисперсных композиций тугоплавких соединений, инициирующих кристаллизацию. Модификаторы по их воздействию можно разделить на две группы [3, 4]:

- модификаторы, являющиеся непосредственными зародышами кристаллизации;
- инокуляторы – модификаторы, изменяющие литую структуру за счет уменьшения перегрева кристаллизующегося металлического расплава.

Как показано в [1, 5], для алюминиевых сплавов целесообразно применение тугоплавких порошков карбида кремния β -модификации (β -SiC) с размером частиц до 100 нм [2].

Целью данной работы является установление связи между структурой и физико-механическими свойствами деформируемых алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Sc.

Материалы и методы исследований. Материалом исследования служил алюминиевый сплав системы Al–Mg марки 01570, разработанный на основе деформируемого сплава АМг6. Химический состав сплавов АМг6 и 01570 приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплавов АМг6 и 01570

Сплав	Массовая доля элементов, %									
	Mg	Mn	Sc	Zr	Cu	Zn	Fe	Si	Be	Al
АМг6 (1560)	5,8–6,8	0,5–0,8	—	0,02–0,10	0,1	0,2	0,4	0,4	0,0002–0,005	основа
01570	5,3–6,3	0,2–0,6	0,15–0,35	0,05–0,15	0,1	0,1	0,3	0,2	0,0002–0,005	основа

Для изучения микроструктуры использовали шлифы, вырезанные из литых заготовок после отжига, а также после деформации. Шлифы перед исследованием подвергали шлифованию и механической полировке. Травление проводили в реактиве концентрированной плавиковой кислоты HF.

Исследование микроструктуры проводили на шлифах с использованием оптического микроскопа Neophot 2 при увеличении 50, 100, 200.

Микрорентгеноспектральный анализ проводили с целью определения химического состава в отдельно взятых точках (на границах зерен и фазе), распределения микролегирующего элемента – скандия и усвоения наномодификатора – карбида кремния (наличие карбидной фазы).

Испытания проводили на многоцелевом растровом микроскопе JSM-6360LA, оснащенный системой рентгеноспектрального энергодисперсионного микроанализа JED 2200.

Результаты и их обсуждение. Микроструктура сплава в равновесном состоянии состоит из α -твердого раствора алюминия и интерметаллида $Al_3(Sc_xZr_{x-1})$. Основными микролегирующими элементами в сплаве 01570 являются скандий и цирконий. Распределение данных элементов по сечению образца равномерно: скандий и цирконий присутствуют как в основе сплава – матрице, так и по границам зерен (рис. 1).

Карбид кремния, очевидно, действует в расплаве как раскислитель, снижая в матрице содержание кислорода. В модифицированных образцах кремний концентрируется во включениях, образуя окись SiO_2 , тем самым повышая прочность материала (табл. 2, рис. 2). Ликвация углерода по сечению образца практически отсутствует (рис. 3), что способствует достижению однородной структуры сплава и повышению прочностных свойств.

Проводили фрактографический анализ изломов на малогабаритном растровом электронном микроскопе МРЭМ-100

Структурными элементами в сплаве 01570 до модифицирования выступает эвтектика (рис. 4а). Эвтектика имеет сетчатую структуру, на границах которой концентрируются неметаллические включения. Это снижает прочностные свойства материала. На поверхности излома образца до модифицирования (рис. 5а) наблюдается межзеренное разрушение, которое представляется как расщепление по границам зерен. На фрактограмме четко видны границы зерен. Микроструктура сплава 01570 после модифицирования не содержит эвтектики (рис. 4б). На поверхности излома модифицированного образца наблюдается вязкое разрушение, которое происходит по плоскостям зерен (рис. 5б).

Механические свойства листов из сплава 01570 до и после модифицирования приведены в табл. 3.

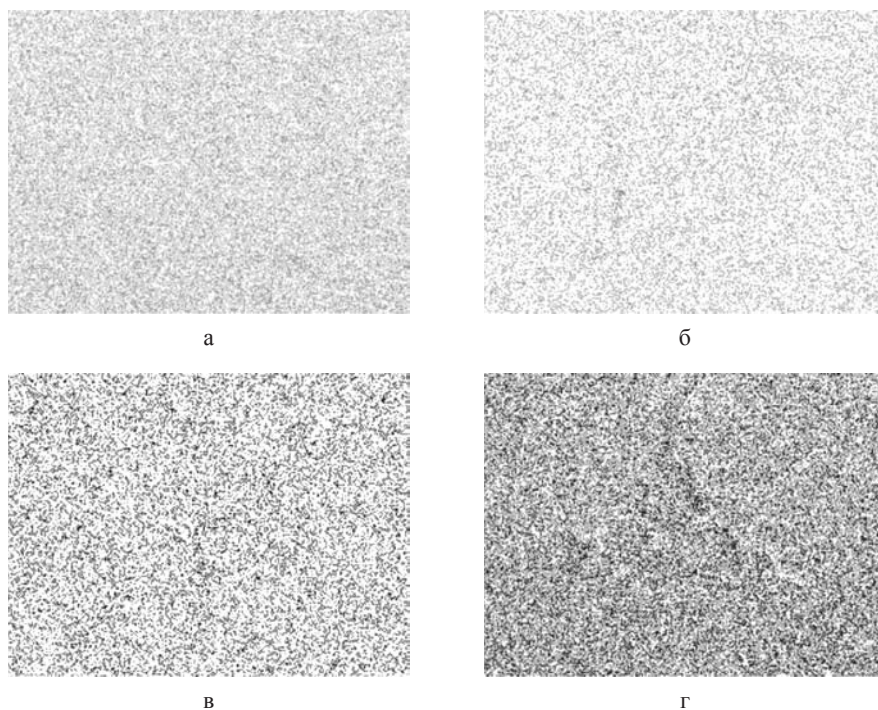


Рис. 1. Распределение микролегирующих элементов (Sc, Zr) в образцах сплава 01570: а, в – до модифицирования; б, г – после модифицирования

Таблица 2

Распределение химических элементов в исследуемых точках сплава 01570 после модифицирования

№ точки	Химический элемент, % мас.						
	C	O	Mg	Al	Si	Sc	Cu
024	10,62	11,61	4,83	35,52	37,43	—	—
025	10,14	6,88	4,76	50,96	24,86	—	2,40
026	2,84	0,47	11,11	66,79	—	—	18,79
027	—	—	4,40	95,49	—	0,11	—

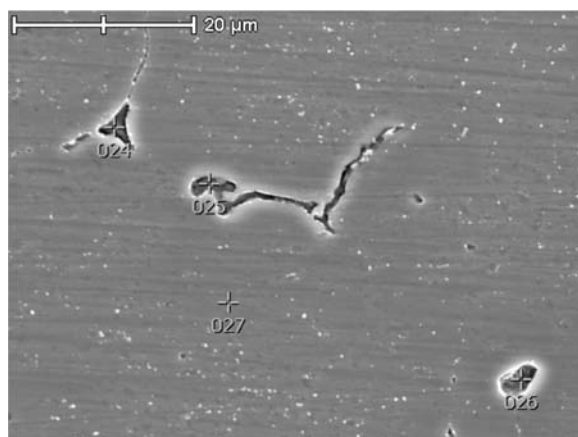


Рис. 2. Исследуемые точки анализа в образце сплава 01570 после модифицирования, $\times 2000$

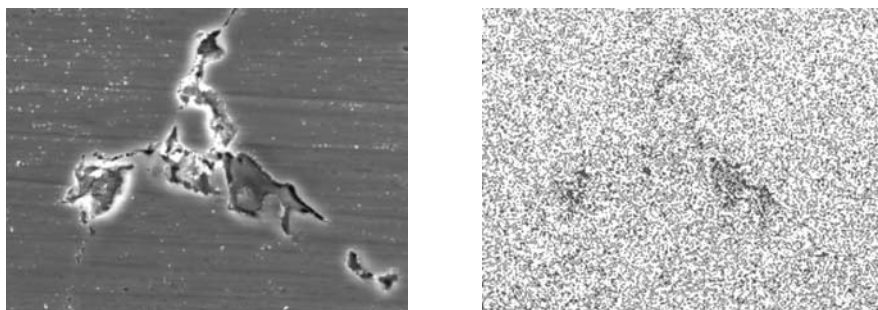


Рис. 3. Распределение углерода по сечению образца сплава 01570 после модифицирования, $\times 2300$

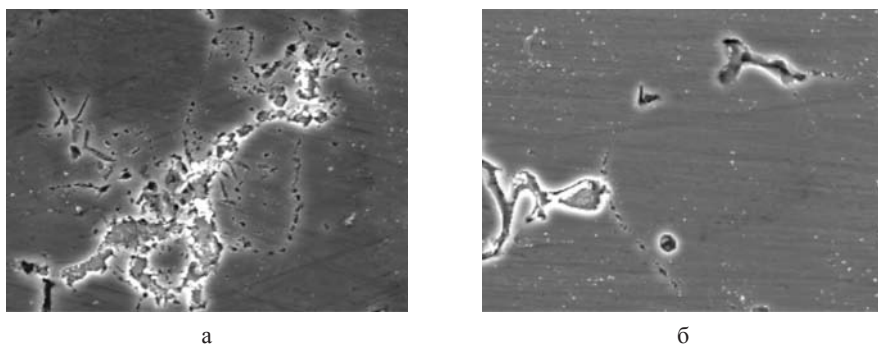


Рис. 4. Основные структурные элементы образцов 01570: а – до модифицирования; б – после модифицирования, $\times 1000$

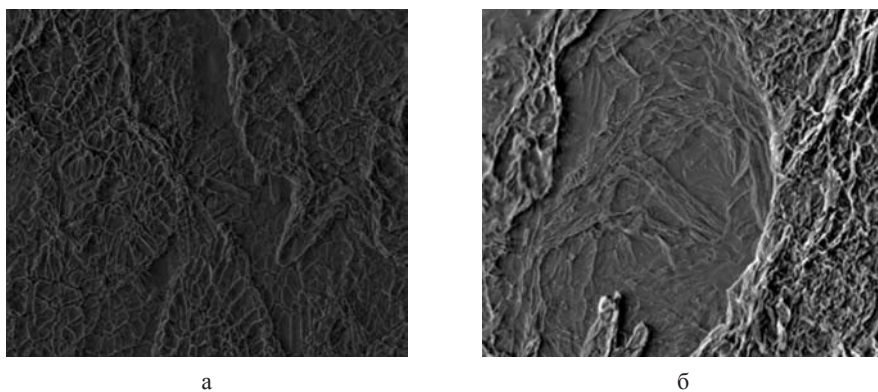


Рис. 5. Излом образца из сплава 01570 после испытания на растяжение при 20 °С: а – до модифицирования; б – после модифицирования, $\times 200$

Таблица 3

Механические свойства листов из сплава 01570

№ образца	Толщина листа, мм	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
01570	2,5	400	280	13,0
01570	3,0	438	344	13,7
01570 + SiC	3,0	470	361	15,4

Выводы. Изучена микроструктура и распределения основных микролегирующих Sc и Zr и модифицирующих SiC элементов по сечению заготовок сплава 01570 до и после модифицирования.

Методом микрорентгеноспектрального анализа доказана эффективность модифицирования сплава 01570 карбидом кремния.

Проведены механические испытания листов из сплава 01570 до и после модифицирования.

Установлено влияние нанодисперсного модификатора карбида кремния β -SiC на структуру и механические свойства алюминиевого сплава 01570. Проведена связь между изменением структуры и повышением механических свойств изучаемого сплава при модифицировании.

Получено измельчения зерна модифицированного сплава 01570, достигнуто однородное распределение легирующих элементов по сечению заготовки, что позволило повысить прочностные свойства сплава на 10 % при удовлетворительной пластичности.

Библиографические ссылки

1. **Вилищук З. В.** Модификаторы высокопрочных алюминиевых сплавов / З. В. Вилищук, Н. Е. Калинина // Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. «Сучасні аспекти металознавства і термічної обробки», Маріуполь, 9–10 верес., 2010 р. – 2010. – С. 80–81.
2. **Калинина Н. Е.** Особенности модифицирования алюминиевых сплавов системы Al–Mg / Н. Е. Калинина, З. В. Вилищук, В. Т. Калинин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7 (84). – С. 80–83.
3. **Мальцев М. В.** Модифицирование структуры металлов и сплавов / М. В. Мальцев. – М. : Металлургия, 1964. – 214 с.
4. **Неменюк Б. М.** Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Б. М. Неменюк. – Л. : Технопринт, 1999. – 272 с.
5. Получение нанокристаллических композиций управляемым плазмохимическим синтезом / В. Т. Калинин, А. С. Дудников, А. Я. Качан, Н. Е. Калинина // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 1 (15). – С. 86–90.

Надійшла до редколегії 05.10.2013.