

УДК 669.715

**Д-р техн. наук Н. Е. Калинина, д-р техн. наук Е. А. Джур,
д-р техн. наук В. Т. Калинин, канд. техн. наук Т. В. Носова, А. В. Кашенкова**

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, г. Днепропетровск

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Предложено комплексное модифицирование порошковым титаном и бором алюминиевого сплава В96Ц1 системы Al-Zn-Mg-Cu. В результате достигнуто измельчение зерна сплава с 300 до 150 мкм и повышение прочностных свойств с 246 до 360 МПа.

Ключевые слова: *алюминиевый сплав, структура, модификатор, механические свойства.*

Введение

Алюминиевые сплавы являются основным конструкционным материалом авиации и реактивной техники XXI века. Для получения удовлетворительного весового эффекта в сочетании с длительным ресурсом работы и надежностью в эксплуатации алюминиевые сплавы должны обладать комплексом необходимых характеристик: высокой удельной прочностью, достаточной коррозионной стойкостью, сопротивлением циклическим нагрузкам и малой скоростью развития усталостных трещин. В авиакосмической технике Украины широко используются литейные и деформируемые сложнелегированные алюминиевые сплавы. Наиболее перспективными из них являются сплавы высокопрочные системы Al-Zn-Mg-Cu.

Состояние проблемы

В настоящее время существует несколько теорий модифицирования, однако нет единого мнения в решении этой проблемы применительно к алюминиевым сплавам [1–3]. Это обусловлено, во-первых, сложностью процесса модифицирования и его зависимостью от условий плавки и литья и, во-вторых, влиянием неконтролируемых примесей и компонентов, которые могут влиять на измельчение исходного зерна сплава. Вводимая в качестве модификатора добавка должна удовлетворять следующим требованиям: обладать достаточной устойчивостью в расплаве без изменения химического состава; температура плавления добавки должна быть выше температуры плавления алюминия. Кроме того, необходимо структурное и размерное соответствие кристаллических решеток модификатора и алюминия.

Роль модификаторов сводится к уменьшению поверхностного натяжения на гранях кристалла, что способствует увеличению скорости зарождения центров кристаллизации [4–6]. Замедление

роста кристаллов приводит к увеличению числа центров кристаллизации и к измельчению структуры. Однако, четкого разделения на модификаторы первого и второго рода и легирующие элементы нет, так как нет веществ, растворимых только в жидком и абсолютно не растворимых в твердом состоянии [7–8].

Материал и методика исследования

Целью работы является достижение упрочнения в многокомпонентных алюминиевых сплавах.

Материалом исследования служил высокопрочный алюминиевый сплав В96Ц1 системы Al-Zn-Mg-Cu, следующего химического состава, % масс.: Zn–2,5 %, Cu–3,0 %, Si–1,8 %, Zr–0,1 %, Ti–0,1 %. Предложено комплексное модифицирование расплава нанодисперсными порошками титана и бора фракцией 100...200 нм. Модификатор получен плазмохимическим синтезом. Фазовый состав и периоды кристаллической решетки сплава до и после модифицирования определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-2,0 в K_{α} - излучении. Микрорентгеноспектральный анализ проведен на приборе «Самеса». Механические испытания проводили на испытательной машине FP-100/1, согласно ГОСТ 1497-84.

Результаты исследования

В данной работе приведен анализ комплексного модифицирования алюминиевого расплава. Если в расплав с основной добавкой, изоморфной алюминию, ввести другую нерастворимую добавку, то в результате уменьшится интервал метастабильности расплава. Как показано в работе [8], наиболее эффективным тугоплавким элементом-модификатором алюминиевых сплавов служит титан. Усилению действия комплексного

модификатора можно дать следующее объяснение. Диборид титана TiB_2 и алюминид титана $TiAl_3$ образуют непрерывный ряд твердых растворов. При температуре $659^\circ C$ образуется тройная эвтектика: $\alpha-Al + TiB_2 + TiAl_3$. Добавка бора расширяет область первичной кристаллизации $TiAl_3$ в результате уменьшения растворимости титана в $\alpha-Al$. Основным модификатором в этом случае является частица TiB_2 , имеющая структурное и размерное соответствие с решеткой алюминия.

Многокомпонентный алюминиевый сплав В96Ц1 содержит 12... 15% масс. растворимых в алюминии легирующих элементов: Zn, Cu, Mg, Mn, Cr, Zr, Ti. Легирующие элементы в закаленном сплаве почти полностью находятся в твердом растворе. В процессе старения сплава твердые растворы распадаются с образованием дисперсных включений упрочняющих фаз. В зависимости от того, где находится легирующий элемент — в твердом растворе или в промежуточной фазе, зависят свойства сплава. О нахождении элементов и о степени перенасыщения можно судить по величине периода кристаллической решетки твердого раствора. Анализ характеристик твердых растворов алюминиевых сплавов показывает, что большинство легирующих элементов уменьшают период решетки [3–4]. Доказательством увеличения периода кристаллической решетки сплава В96Ц1, модифицированного титаном, служило повышение микротвердости $\alpha-Al$ -твердого раствора. Фазовый состав сплава В96Ц1, закристаллизовавшегося в равновесных условиях в песчаную форму, представлен α -твердым раствором Al и многочисленными двойными интерметаллидными фазами. В табл. 1 приведены выявленные интерметаллидные фазы.

Результаты рентгенофазового анализа модифицированных образцов сплава В96Ц1 также подтверждает наличие интерметаллидных фаз сложного состава (табл. 2).

Таблица 1 — Интерметаллические фазы, упрочняющие сплав В96Ц1

| До модифицирования | После модифицирования |
|--------------------|-----------------------|
| $FeAl_3$ | $FeAl_3$ |
| $CuAl_2$ | $Al_3Ti, CuAl_2$ |
| $MgZn_2$ | $MgZn, MnZn_3$ |
| Al_2Cu_2Fe | Al_2Cu_2Fe |
| Mg_2Si | Mg_2Si |

Появление новых интерметаллидов сложного состава, свидетельствует об эффективном действии модификатора на процесс кристаллизации сплава, что подтверждается также экспериментальными данными увеличения периода кристаллической решетки модифицированного сплава по сравнению с исходным на 2%. В модифицированном

сплаве достигнуто измельчение зеренной структуры с 300 до 150 мкм. Исследование распределения легирующих элементов и примесей в алюминиевой основе сплава до и после модифицирования показало более однородное распределение алюминия, цинка, железа, кремния, циркония. В модифицированных образцах обнаружены упрочняющие интерметаллидные фазы: $Al_3Ti, TiB_2, CuAl_2, MgZn, Mg_2Si$ (рис. 1).

Резкое снижение содержания магния и меди свидетельствовало о присутствии их в интерметаллидных фазах. Повышенное содержание титана (от 0,12 до 0,44%) доказывает участие его в процессе модифицирования.

В табл. 3 приведены механические свойства сплава В96Ц1 до и после модифицирования титаном.

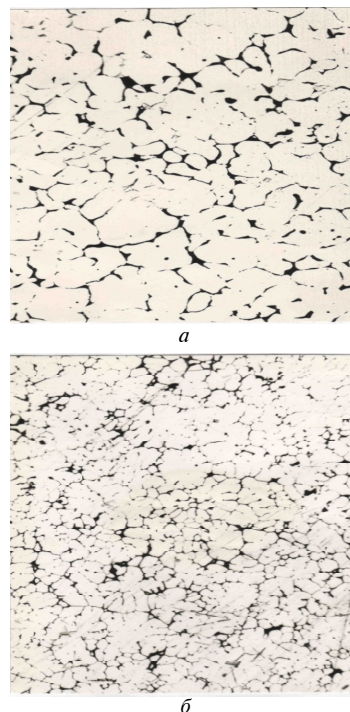


Рис. 1. Зеренная структура сплава В96Ц1, $\times 100$: а — до модифицирования; б — после модифицирования

Выводы

1. Определены критерии модифицирования высокопрочных алюминиевых сплавов.
2. Обоснованно выбран в качестве комплексного модификатора сплава В96Ц1 нанодисперсный порошок титана фракции 100200 нм, полученный плазмохимическим синтезом.
3. Достигнуто измельчение зерна сплава В96Ц1 в результате комплексного модифицирования.
4. Наиболее эффективно модифицирование композицией (0,05% Ti+V), в результате которого получено измельчение зерна с 300 до 150 мкм и повышение прочностных свойств сплава с 246 до 360 МПа.

Таблица 2 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа фаз сплава В96Ц1 до и после модифицирования

| Состояние образца | Содержание легирующих элементов, % | | | |
|----------------------------|------------------------------------|------|------|-------|
| | Al | Zn | Mg | Fe |
| Немодифицированный | 49,7 | 2,48 | 0,0 | 29,58 |
| Модифицированный 0,005% Ti | 46,3 | 1,73 | 0,0 | 34,19 |
| Модифицированный 0,05% Ti | 48,1 | 2,0 | 0,0 | 18,50 |
| Состояние образца | Содержание легирующих элементов, % | | | |
| | Cu | Si | Ti | Zr |
| Немодифицированный | 2,84 | 1,83 | 0,02 | 0,09 |
| Модифицированный 0,005% Ti | 2,23 | 4,73 | 0,12 | 0,03 |
| Модифицированный 0,05% Ti | 2,70 | 6,30 | 0,44 | 0,01 |

Список литературы

1. Мальцев М. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов / М. В. Мальцев. – М. : Металлургия, 1984. – 282 с.
2. Алюміній та сплави на його основі : навч. посібник / [Куцова В. З., Погребна Н. Є. Хохлова Т. С. та ін.] – Д. : Пороги, 2004. – 135 с.
3. Оно А. Затвердевание металлов / Оно А. – М. : Металлургия, 1980. – 147 с.

Таблица 3 – Механические свойства сплава В96Ц1

| Модификатор Ti, B, % | σ_e , МПа | σ_m , МПа | δ , % | Размер зерна, мкм | КСУ, МДж/м ² |
|----------------------|------------------|------------------|--------------|-------------------|-------------------------|
| – | 246 | 202 | 8,0 | 205 | 0,36 |
| 0,005 | 258 | 214 | 7,1 | 185 | 0,30 |
| 0,05 | 370 | 300 | 5,6 | 75 | 0,25 |
| 0,10 | 360 | 308 | 4,6 | 55 | 0,30 |

4. Чалмерс Б. Теория затвердевания / Чалмерс Б. – М. : Металлургия, 1986. – 287 с.
5. Авиационно- космические материалы и технологии. Учебник для вузов / [В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, Н. Е. Калинина и др.]. – Запорожье : Мотор Сич, 2007. – 382 с.
6. Тушинский Л. И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов / Тушинский Л. И. – Новосибирск : Наука, 1990. – 306 с.
7. Ганиев И. Н. Модифицирование силуминов стронцием / И. Н. Ганиев, П. О. Пархутин, А. В. Вахобов. – Минск : Наука и техника, 1985. – 143 с.
8. Калинина Н. Е. Термоупрочняющая обработка многокомпонентных алюминиевых сплавов / Калинина Н. Е. // Новые процессы термической обработки. – Харьков : ННЦХФТЧ, 2004. – С. 171–199.

Поступила в редакцию 23.03.2016

Калініна Н.Є., Джур Є.О., Калінін В.Т., Носова Т.В., Кашенкова А.В. Вплив модифікування на структуру та механічні властивості складнолегованих алюмінієвих сплавів

Запропоновано комплексне модифікування порошковим титаном і бором алюмінієвого сплаву В96Ц1 системи Al-Zn-Mg-Cu. В результаті досягнуто подрібнення зерна сплаву з 300 до 150 мкм і підвищення міцності властивостей з 246 до 360 МПа.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, структура, модифікатор, механічні властивості.

Kalinina N., Dzhur E., Kalinin V., Nosova T., Kashenkova A. Influence of retrofitting on structure and mechanical properties of сложнолегированных of aluminium alloys

Integrated proposals modifyfytsyrovanye poroshkovym titanium and boron alloy alyuminyevoho V96TS1 system Al-Zn-Mg-Cu. As a result of mature grains yzmelchenye alloy with 300 to 150 microns and Increase prochnostnyh properties with 246 to 360 MPa.

Key words: aluminium alloy, the structure, a modifier, mechanical properties.