

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Cu-Li-Mg

**Бецофен С.Я.\* , Осинцев О.Е.\*\* , Князев М.И.\*\*\* ,  
Долгова М.И.\*\*\*\* , Кабанова Ю.А.\*\*\*\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

\* e-mail: s.betsofen@gmail.com

\*\* e-mail: osintcevoe@mai.ru

\*\*\* e-mail: kniazevmk@bk.ru

\*\*\*\* e-mail: dolgowami@gmail.com

\*\*\*\*\* e-mail: djulia.kbz@yandex.ru

Предложена новая классификация Al-Cu-Li-Mg сплавов, которые следует разделить на пять групп, различающихся отношением долей двойной  $\delta'$ -фазы ( $W\delta$ ) и тройных фаз,  $S_1$  ( $Ws$ ) или  $T_1$  ( $Wt$ ). Разработана методика расчета количества  $T_1$ ,  $S_1$  и  $\delta'$ -фаз для Al-Cu-Li-Mg сплавов на основании экспериментального измерения периодов решетки  $\alpha$ -твердого раствора, при этом содержание лития в твердом растворе служит в качестве варьируемого параметра. Показано, что разработанная методика может эффективно использоваться для количественной интерпретации результатов исследований влияния термической и термомеханической обработок на фазовый состав сплавов, а также при оптимизации составов сплавов систем Al-Cu-Li-Mg.

*Ключевые слова:* Al-Li сплавы, количественный фазовый анализ,  $\delta'$ -фаза.

Согласно стратегиям развития интегрированных структур (Объединенная авиастроительная корпорация — ОАК, объединенная двигателестроительная корпорация — ОДК и др.), основной задачей является создание в России конкурентоспособной авиационной отрасли с существенным повышением доли на мировом рынке отечественных самолетов к 2025 году [1—4]. Для обеспечения конкурентоспособности отечественных изделий необходимо создание и применение материалов, обладающих высокими удельными характеристиками при низкой плотности. В связи с этим актуальной является разработка алюминий-литиевых сплавов и технологий их изготовления, которые сочетают в себе высокие характеристики прочности, трещиностойкости и коррозионной стойкости, обладая при этом пониженным на 10—15% удельным весом по сравнению с алюминиевыми сплавами традиционных систем легирования.

Для интерпретации и контроля анизотропии прочностных и упругих свойств, а также прогнозирования термической стабильности Al-Li сплавов

необходимо иметь информацию о количественном соотношении в них интерметаллидных фаз. В [5] была разработана методика количественного фазового анализа для сплавов систем Al-Mg, Al-Cu, Al-Mg-Li, основанная на измерении параметра решетки твердого раствора. В [6—8] эта методика была адаптирована применительно к сплавам системы Al-Cu-Li. Применение этих методик для промышленных сплавов показало, что они должны быть скорректированы с учетом того, что для промышленных сплавов характерно наличие других легирующих элементов, которые могут находиться в твердом растворе, образовывать самостоятельные фазы или входить дополнительным компонентом в существующие фазы. Так, в [9] показано, что содержание магния в сплавах Al-Cu-Li-Mg примерно одинаково в твердом растворе и  $\delta'$  ( $Al_3Li$ )-фазе. Этот результат позволяет учитывать содержание магния в сплавах системы Al-Cu-Li, которое для этих сплавов может достигать 1,3% (табл. 1). Целью исследования было развитие метода количественного фазового анализа применительно к промышленным сплавам систе-

мы Al-Cu-Li-Mg и предложение на этой основе новой классификации Al-Li сплавов, построенной на количественном критерии, а именно соотношении интерметаллидных  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) и  $T_1$  ( $\text{Al}_2\text{CuLi}$ ) фаз.

Вывод уравнений расчета для системы Al-Cu-Li-Mg практически не отличается от того, что было получено [8]. Запишем уравнения баланса элементного и фазового состава для сплавов Al-Cu-Li:

$$\begin{aligned} 100X_{\text{Al}}^0 &= X_{\text{Al}}^\alpha W_\alpha + X_{\text{Al}}^{T_1} W_{T_1} + X_{\text{Al}}^{\delta'} W_{\delta'}; \\ 100X_{\text{Cu}}^0 &= X_{\text{Cu}}^\alpha W_\alpha + X_{\text{Al}}^{T_1} W_{T_1}; \\ 100X_{\text{Li}}^0 &= X_{\text{Li}}^\alpha W_\alpha + X_{\text{Li}}^{T_1} W_{T_1} + X_{\text{Li}}^{\delta'} W_{\delta'}; \\ W_\alpha + W_{T_1} + W_{\delta'} &= 100, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $X_{\text{Al}}^0, X_{\text{Cu}}^0, X_{\text{Li}}^0$  — концентрации Al, Cu и Li в сплаве соответственно (мас. %);  $W_\alpha + W_{T_1} + W_{\delta'}$  — массовый процент  $\alpha$ -,  $T_1$ - и  $\delta'$ -фаз;

$X_{\text{Al}}^\alpha, X_{\text{Cu}}^\alpha, X_{\text{Li}}^\alpha, X_{\text{Al}}^{T_1}, X_{\text{Li}}^{T_1}, X_{\text{Cu}}^{T_1}, X_{\text{Al}}^{\delta'}, X_{\text{Li}}^{\delta'}$  — концентрации Al, Cu и Li в  $\alpha$ -,  $T_1$ - и  $\delta'$ -фазах.

Значения параметров  $X_{\text{Al}}^S, X_{\text{Al}}^{\delta'}, X_{\text{Al}}^{T_1}, X_{\text{Li}}^{T_1}, X_{\text{Li}}^{\delta'}$  рассчитываются из стехиометрии  $T_1(\text{Al}_2\text{CuLi})$  и  $\delta'(\text{Al}_3\text{Li})$ -фаз. Единственное различие в уравнениях — это величина  $X_{\text{Cu}}^\alpha$ , которая определяется из параметра решетки твердого раствора  $a_\alpha$  в соответствии с законом Вегарда. В отличие от аналогичного уравнения, в [8] вводится дополнительное слагаемое

$$-W_\alpha^{\text{cp}} X_{\text{Mg}}^0 \left( \frac{\Delta a}{\Delta X} \right)_{\text{Mg}}^\alpha, \text{ которое учитывает изменение}$$

параметра решетки из-за наличия в твердом растворе магния:

$$X_{\text{Cu}}^\alpha = \left( a_\alpha - a_{\text{Al}} - W_\alpha^{\text{cp}} X_{\text{Mg}}^0 \left( \frac{\Delta a}{\Delta X} \right)_{\text{Mg}}^\alpha \right) / \left( \frac{\Delta a}{\Delta X} \right)_{\text{Cu}}^\alpha,$$

где  $\left( \frac{\Delta a}{\Delta X} \right)_{\text{Mg}(\text{Cu})}^\alpha$  — изменение параметра решетки на

1 массовый процент легирующего элемента, Mg (Cu) ( $\text{\AA}/\text{мас. \%}$ );  $W_\alpha^{\text{cp}}$  — среднее значение количества твердого раствора для данного сплава;  $X_{\text{Mg}}^0$  — содержание магния в сплаве.

Решение системы (1), в которой содержание лития в  $\alpha$ -фазе ( $X_{\text{Li}}^\alpha$ ) является переменным параметром, будет таким же, как и в [4]:

$$\begin{aligned} W_\alpha &= [(X_{\text{Li}}^\delta - X_{\text{Li}}^{T_1})(X_{\text{Al}}^0 X_{\text{Cu}}^{T_1} - X_{\text{Al}}^{T_1} X_{\text{Cu}}^0) - \\ &- X_{\text{Al}}^\delta X_{\text{Cu}}^{T_1} (X_{\text{Li}}^0 - X_{\text{Li}}^{T_1})] / [(X_{\text{Li}}^\delta - X_{\text{Li}}^{T_1})(100X_{\text{Cu}}^{T_1} - \\ &- X_{\text{Cu}}^\alpha X_{\text{Cu}}^{T_1} - X_{\text{Cu}}^{T_1} X_{\text{Li}}^\alpha - X_{\text{Al}}^{T_1} X_{\text{Cu}}^\alpha) - \\ &- X_{\text{Al}}^\delta X_{\text{Cu}}^{T_1} (X_{\text{Li}}^\alpha - X_{\text{Li}}^{T_1})] \times 100; \end{aligned} \quad (2)$$

$$W_{T_1} = \frac{100X_{\text{Cu}}^0 - X_{\text{Cu}}^\alpha W_\alpha}{X_{\text{Cu}}^{T_1}};$$

$$W_{\delta'} = 100 - W_\alpha - W_{T_1}.$$

В табл. 1 приведены составы в массовых и атомных процентах для 29 российских и американских сплавов Al-Li разных поколений, для которых рассчитаны отношения массовых и атомных концентраций лития к меди для сплавов системы Al-Cu-Li-(Mg) (25 сплавов) и Al-Mg-Li (4 сплава).

На рис. 1 приведены зависимости количества  $\alpha$ -,  $S_1$ - и  $\delta'$ -фаз для сплава 1420, а на рис. 2 и 3 — для сплавов системы Al-Cu-Li-(Mg) 1469 и 1441 соответственно. Расчеты выполнены для концентрации лития в твердом растворе  $X_{\text{Li}}^\alpha = 0$  (рис. 1—3), что соответствует максимальному значению количества  $\delta'$ -фазы, которое имеет место после длительного низкотемпературного старения на  $\delta'$ -фазу, и для  $X_{\text{Li}}^\alpha = 0,5$ , что близко к равновесной концентрации при комнатной температуре (рис. 1—3).

Легирование магнием существенно влияет на сплавы системы Al-Cu-Li. На рис. 4 приведена зависимость фазового состава сплава 1441 такого же состава, как и на рис. 3, но без магния.

Видно, что 1% магния всего на 0,4% увеличивает долю интерметаллидных фаз, но при этом существенно повышает концентрацию магния в твердом растворе, что сопровождается заметным увеличением периода решетки, который варьируется в пределах 4,0492—4,0532  $\text{\AA}$  в сплавах с магнием (рис. 3) и от 4,0453 до 4,0492  $\text{\AA}$  — при отсутствии магния в сплаве (рис. 4). Это должно оказывать влияние на все физико-химические и механические свойства сплава, причем использование методики количественного фазового анализа дает возможность поиска количественных корреляций этих свойств с содержанием легирующих элементов. В

Таблица 1

Массовые, атомные процентные доли, их отношения и отношения количества  $\delta'$  - и  $T_1$ -фаз для Al-Li сплавов трех поколений

| Сплав | Поколение сплава | Мас.% |      |      | Ат.% |      |      | мас       | ат     | $W_{\delta} / W_{T(S)}$<br>$X_{Li}^{\alpha} = 0$ |
|-------|------------------|-------|------|------|------|------|------|-----------|--------|--|
|       |                  | Li    | Cu   | Mg   | Li   |      | Mg   | Li/Cu(Mg) |        |  |
| 2020  | 1                | 1,2   | 4,5  | 0,00 | 4,62 | 1,89 | 0,00 | 0,27      | 2,44   | 2,3  |
| 5091  | 1                | 1,3   | 0    | 3,95 | 4,87 | 0,00 | 4,21 | (0,36)    | (1,16) | 1,3  |
| 1424  | 1                | 1,7   | 0    | 5,00 | 6,30 | 0,00 | 5,26 | (0,40)    | (1,20) | 1,4  |
| 1420  | 1                | 2     | 0    | 5,60 | 7,35 | 0,00 | 5,84 | (0,34)    | (1,26) | 1,5  |
| 1421  | 1                | 2,1   | 0    | 5,20 | 7,69 | 0,00 | 5,41 | (0,36)    | (1,42) | 1,9  |
| 1450  | 2                | 2,1   | 2,9  | 0,00 | 7,82 | 1,18 | 0,00 | 0,72      | 6,63   | 7,4  |
| 1460  | 2                | 2,25  | 2,9  | 0,00 | 8,34 | 1,17 | 0,00 | 0,78      | 7,10   | 7,9  |
| 2090  | 2                | 2,1   | 2,7  | 0,00 | 7,81 | 1,10 | 0,00 | 0,78      | 7,12   | 7,8  |
| 2091  | 2                | 2     | 2    | 1,30 | 7,43 | 0,81 | 1,36 | 1,00      | 9,16   | 10, 6  |
| 1441  | 2                | 1,8   | 1,8  | 0,90 | 6,72 | 0,73 | 0,95 | 1,00      | 9,16   | 10, 7  |
| 8090  | 2                | 2,4   | 1,5  | 0,80 | 8,79 | 0,60 | 0,83 | 1,60      | 14,65  | 16, 9  |
| 1440  | 2                | 2,4   | 1,5  | 0,80 | 8,79 | 0,60 | 0,83 | 1,60      | 14,65  | 16, 9  |
| 2094  | 3                | 1,1   | 4,8  | 0,40 | 4,26 | 2,03 | 0,43 | 0,23      | 2,10   | 1,95   |
| 2195  | 3                | 1     | 4    | 0,40 | 3,86 | 1,69 | 0,43 | 0,25      | 2,29   | 2,2  |
| 2050  | 3                | 1     | 3,6  | 0,40 | 3,85 | 1,52 | 0,43 | 0,28      | 2,54   | 2,5  |
| 2065  | 3                | 1,2   | 4,2  | 0,50 | 4,62 | 1,76 | 0,54 | 0,29      | 2,62   | —  |
| 2098  | 3                | 1,05  | 3,5  | 0,53 | 4,04 | 1,47 | 0,57 | 0,30      | 2,75   | 2,8  |
| 2055  | 3                | 1,15  | 3,7  | 0,40 | 4,42 | 1,55 | 0,43 | 0,31      | 2,85   | —  |
| 2198  | 3                | 1     | 3,2  | 0,50 | 3,85 | 1,34 | 0,54 | 0,31      | 2,86   | 2,8  |
| 1460  | 3                | 1,4   | 4,3  | 0,00 | 5,36 | 1,80 | 0,00 | 0,33      | 2,98   | 2,96   |
| 2297  | 3                | 1,4   | 2,8  | 0,25 | 5,31 | 1,16 | 0,27 | 0,50      | 4,58   | 4,9  |
| 2397  | 3                | 1,4   | 2,8  | 0,25 | 5,31 | 1,16 | 0,27 | 0,50      | 4,58   | —  |
| 1464  | 3                | 1,7   | 3    | 0,00 | 6,40 | 1,23 | 0,00 | 0,57      | 5,19   | 5,1  |
| 2196  | 3                | 1,75  | 2,9  | 0,50 | 6,58 | 1,19 | 0,53 | 0,60      | 5,52   | 6,0  |
| 1461  | 3                | 1,7   | 2,8  | 0,00 | 6,40 | 1,15 | 0,00 | 0,61      | 5,56   | 6,0  |
| 2199  | 3                | 1,6   | 2,6  | 0,20 | 6,03 | 1,07 | 0,21 | 0,62      | 5,63   | 6,0  |
| 2076  | 3                | 1,5   | 2,35 | 0,50 | 5,66 | 0,97 | 0,53 | 0,64      | 5,84   | —  |
| 2096  | 3                | 1,6   | 2,45 | 0,60 | 6,02 | 1,01 | 0,64 | 0,65      | 5,98   | 6,7  |
| 2099  | 3                | 1,8   | 2,7  | 0,30 | 6,75 | 1,11 | 0,32 | 0,67      | 6,10   | 6,8  |

перспективе это открывает новые возможности оптимизации поиска эффективных составов сплавов для различных областей применения, что особенно важно в авиации, где требования к комплексу служебных свойств различных узлов конструкции планера варьируются в широких пределах.

Представленные на рис. 1–4 зависимости позволяют оценить средние значения количества  $\alpha$ -,  $T_1(S_1)$ - и  $\delta'$ -фаз для каждого сплава в соответствующем диапазоне изменения периода решетки твердого раствора, который определялся из условия

$$X_{Cu(Mg)}^{\alpha} \geq 0; W_{T_1} \geq 0; W_{\delta} \geq 0; W_{S_1} \geq 0.$$

При этом соотношение интерметаллидных фаз определяется отношением концентраций лития и меди в сплаве. Действительно, максимальное количество  $T_1$ -фазы соответствует отсутствию меди в твердом растворе и определяется молярной концентрацией меди в сплаве. Максимальное количество  $\delta'$ -фазы соответствует отсутствию лития в твердом растворе и определяется разностью молярных концентраций лития и меди, поскольку тройная фаза

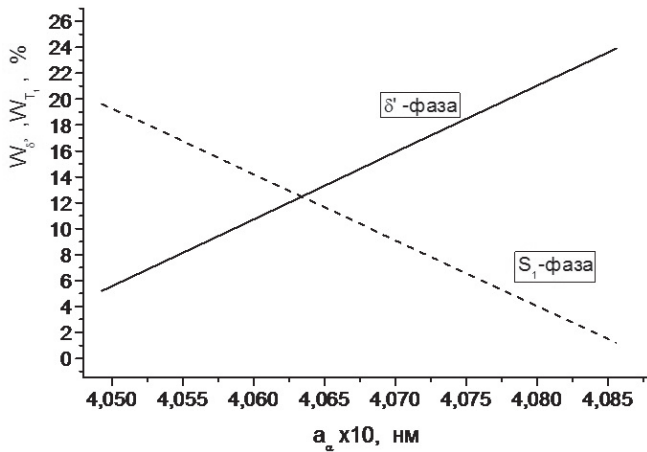


Рис. 1. Соотношение  $\delta'$ -фазы (сплошная линия) и  $T_1$ -фазы (штриховая линия) в сплаве 1420 (Al-5,6Mg-2Li) в зависимости от параметра решетки твердого раствора ( $a_\alpha$ ) для содержания лития в твердом растворе  $X_{Li}^\alpha = 0\%$

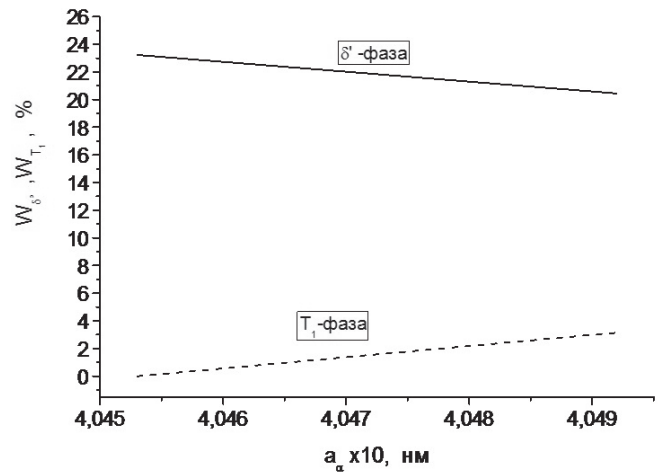


Рис. 4. Соотношение  $\delta'$ -фазы (сплошная линия) и  $T_1$ -фазы (штриховая линия) в сплаве 1441 (Al-1,4Cu-1,8Li) в зависимости от параметра решетки твердого раствора ( $a_\alpha$ ) для содержания лития в твердом растворе  $X_{Li}^\alpha = 0\%$

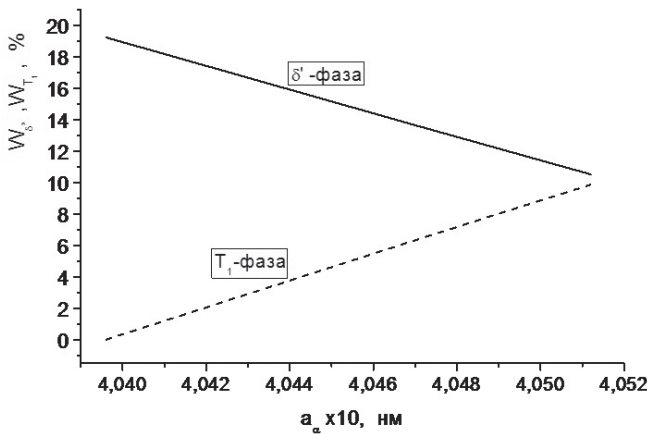


Рис. 2. Соотношение  $\delta'$ -фазы (сплошная линия) и  $T_1$ -фазы (штриховая линия) в сплаве 1469 (Al-4,3Cu-1,4Li-0,5Mg) в зависимости от параметра решетки твердого раствора ( $a_\alpha$ ) для содержания лития в твердом растворе  $X_{Li}^\alpha = 0\%$

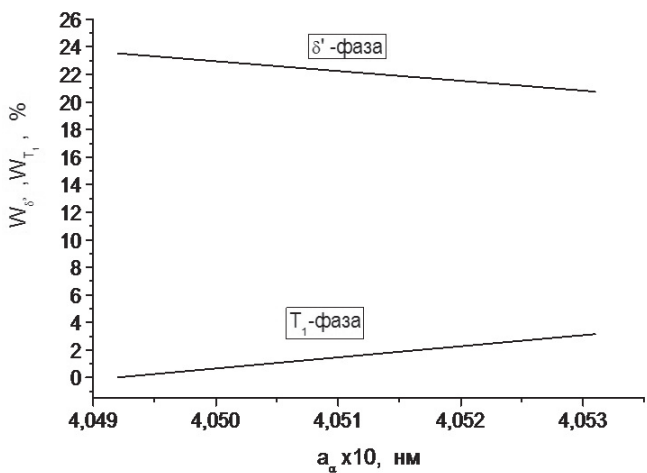


Рис. 3. Соотношение  $\delta'$ -фазы (сплошная линия) и  $T_1$ -фазы (штриховая линия) в сплаве 1441 (Al-1,4Cu-1,8Li-1,0Mg) в зависимости от параметра решетки твердого раствора ( $a_\alpha$ ) для содержания лития в твердом растворе  $X_{Li}^\alpha = 0\%$

имеет состав  $Al_2CuLi$ , и если в твердом растворе нет ни меди ни лития, то эти элементы вынуждены распределяться между этими интерметаллидами. Если при этом образуется какое-то количество  $\Theta$  ( $\Theta'$ ,  $\Theta''$ )-фаз, то это мало что изменит — только уменьшится количество  $T_1$ -фазы за счет выделения двойных медьсодержащих фаз. Поскольку вся медь находится в тройной фазе, где на каждый атом меди приходится атом лития, то разница атомных концентраций лития и меди регламентирует максимальное количество  $\delta'$ -фазы в сплаве. Из результатов, приведенных на рис. 5 и в табл. 1, видно, что для сплавов системы Al-Cu-Li количество  $\delta'$ -фазы значительно превышает количество  $T_1$ -фазы: отношение  $W_{\delta'}/W_{T(S)}$  равно 2—6 для сплавов 2-го поколения (табл. 1) и 7—17 — для сплавов 3-го поколения.

Если сравнить характер фазовых соотношений  $\delta'$ -фазы и тройных фаз в сплавах Al-Cu-Li и Al-Mg-Li, то хорошо видно, что в сплавах с магнием их количество примерно одинаково, в то время как в сплавах Al-Cu-Li количество  $\delta'$ -фазы значительно превышает количество тройной фазы. Как уже было сказано, отношение долей  $\delta'$  ( $Al_3Li$ )- и  $S_1$  ( $T_1$ )-фаз определяется отношением атомных концентраций Li и Mg (Cu). В сплавах Al-Mg-Li отношение атомных долей Li и Mg составляет 1.0—1.9, и поэтому количество  $\delta'$ - и  $S_1$ - фаз примерно одинаково (табл. 1), в то время как для сплавов Al-Cu-Li отношение атомных долей Li и Cu варьируется от 2

до 17, поэтому в них  $\delta'$ -фаза доминирует. Так, в сплаве 1420 (Al-5.8 ат.% Mg-7.3 ат. %Li) количество  $\delta'$ -фазы варьируется от 5 до 24%, а  $S_1$ -фазы — от 1 до 20% (см. рис. 1).

На рис. 5 обобщены результаты определения фазового состава для 24 сплавов. Видно, что существует близкая к линейной зависимость относительных долей интерметаллидных фаз в сплавах ( $W_{\delta'} / W_{T_1(S_1)}$ ) от отношения атомных концентраций

лития и меди (магния) в этих сплавах ( $Y_{Li}^{\alpha} / Y_{Cu(Mg)}^{\alpha}$ ).

Важно отметить, что приведенная на рис. 5 зависимость отношения долей интерметаллидных фаз от отношения атомных концентраций четко разделяет сплавы разных типов, которые принято рассматривать как сплавы разных поколений. Как уже было сказано выше, сплавы системы Al-Mg-Li характеризуются близким к единице отношением лития и магния, что соответствует примерно такому же отношению  $\delta'$ - и  $S_1$ -фаз. На рис. 5 эти сплавы обозначены как сплавы 1-го поколения [10], однако более точное их обозначение — сплавы системы Al-Mg-Li.

Сплавы 2-го и 3-го поколения относятся к системе Al-Cu-Li, и они четко разделены (рис. 5), что отражает основной мотив разработки сплавов 3-го поколения — снизить содержание лития в сплаве и тем самым предотвратить эффект охрупчивания при длительной низкотемпературной нагрузке, который связывают с выделением из пересыщенного твердого раствора  $\delta'$ -фазы. Это достигается снижением количества лития в сплавах, при этом доля меди увеличивается. В результате отношение лития к меди и, соответственно, отношение  $\delta'$ - и  $S_1$ -фаз составляет 2—7 для сплавов 3-го поколения, что существенно ниже, чем в сплавах 2-го поколения, для которых эти величины варьируются в пределах 7—17 (табл. 1, рис. 5). Такая интерпретация идеологии легирования сплавов Al-Cu-Li предоставляет новые возможности для анализа влияния состава сплавов на комплекс их служебных свойств на количественном уровне и дает хорошую перспективу для оптимизации составов этих сплавов.

Предложенный количественный подход к оценке фазового состава можно использовать для уточнения классификации Al-Cu-Mg-Li сплавов. О необходимости такого уточнения свидетельствует тот факт, что имеющееся разделение сплавов на поколения отражает только временные рамки создания сплавов, хотя в этом присутствует определенная

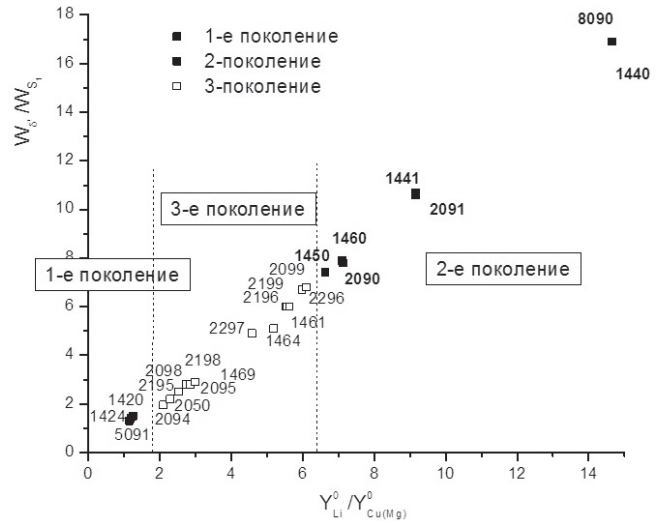


Рис. 5. Зависимость относительных долей интерметаллидных фаз в сплавах системы Al-Cu(Mg)-Li ( $W_{\delta'} / W_{T_1(S_1)}$ ) от отношения атомных концентраций лития и меди (магния) в этих сплавах ( $Y_{Li}^{\alpha} / Y_{Cu(Mg)}^{\alpha}$ )

тенденция. Существует другая классификация, основанная на соотношении легирующих элементов и комплекса служебных свойств [11]:

1) сплавы с низким содержанием меди (< 2%), высоким содержанием лития (2,2—2,8 %) и относительно высоким содержанием магния (0,5—1,5%). Эти сплавы имеют среднюю прочность ( $\sigma_B = 430 \div 500$  МПа) при высокой вязкости разрушения и низкой технологичности, особенно при холодной деформации;

2) сплавы со средним содержанием меди (2,0—3,5 %) и лития (1,5—2,2%), с малой добавкой магния (0,5 %). Эти сплавы имеют высокую прочность ( $\sigma_B = 480 \div 600$  МПа) при удовлетворительной вязкости разрушения и удовлетворительных технологических свойствах;

3) сплавы с высоким содержанием меди (3,5—6,0 %), низким содержанием лития (~ 1,3 %) и малой добавкой магния (~ 0,4 %). Эти сплавы, особенно с добавкой Ag, имеют очень высокую прочность ( $\sigma_B$  до 700—720 МПа) при пониженной пластичности и высокой плотности.

К тем кратким характеристикам, которые даны каждой группе, следует добавить, что плотность сплавов в основном зависит от содержания меди и лития; для сплавов первой группы она минимальна, а для третьей группы — максимальна. Коррозионная стойкость сплавов с повышением содержания меди ухудшается, но может быть улучшена путем выбора оптимального режима термической

обработки. Сплавы системы Al-Cu-Mg-Li, уступая сплавам системы Al-Mg-Li по плотности, но будучи более прочными и технологичными в металлургическом производстве, нашли более широкое применение.

Мы предлагаем классификацию (табл. 2), основанную на относительной атомной концентрации лития и меди для сплавов Al-Cu-Mg-Li и лития и магния для сплавов Al-Mg-Li, которую можно сделать более универсальной, если выбрать в качестве критерия отношение долей  $\delta'$ -фазы и тройной фазы ( $T_1$ - или  $S_1$ -фазы). Этот вариант классификации приведен в табл. 2. Все сплавы разделены на пять групп. В первую группу входят сплавы Al-Mg-Li, для которых отношение фаз  $W_\delta / W_S < 2$ . Для второй группы это отношение от 2 до 3, для третьей

группы — от 5 до 7, для четвертой — от 7 до 8 и для пятой группы — от 11 до 17.

### Выводы

Разработана методика расчета количества  $T_1$ -,  $S_1$ - и  $\delta'$ -фаз для Al-Cu-Li-Mg сплавов на основании экспериментального измерения периодов решетки  $\alpha$ -твердого раствора, при этом содержание лития в твердом растворе служит в качестве варьируемого параметра. Показано, что разработанная методика может эффективно использоваться для количественной интерпретации результатов исследований влияния термической и термомеханической обработок на фазовый состав сплавов, а также при оптимизации составов сплавов систем Al-Cu-Li-Mg. В сплавах соотношение между  $\delta'$ -фазой и тройными фазами определяется атомными долями

Таблица 2

Атомные процентные доли, их отношения, средние значения количества  $\delta'$ - и  $T_1$ -фаз для  $X_{Li}^\alpha = 0$ , их отношения для Al-Li сплавов

| Сплав | Группа | Ат.% |      |      | $W_\delta$                | $W_{T(S)}$ | Li/Cu(Mg) | $W_\delta / W_{T(S)}$ |
|-------|--------|------|------|------|---------------------------|------------|-----------|-----------------------|
|       |        | Li   | Cu   | Mg   | $X_{Li}^\alpha = 0$ (ср.) |            | Ат.%      |                       |
| 5091  | 1      | 4,87 | 0,00 | 4,21 | 9,3                       | 7,0        | (1,16)    | 1,3                   |
| 1424  | 1      | 6,30 | 0,00 | 5,26 | 12,45                     | 8,75       | (1,20)    | 1,4                   |
| 1420  | 1      | 7,35 | 0,00 | 5,84 | 15,15                     | 9,8        | (1,26)    | 1,5                   |
| 1421  | 1      | 7,69 | 0,00 | 5,41 | 17,2                      | 9,1        | (1,42)    | 1,9                   |
| 2094  | 2      | 4,26 | 2,03 | 0,43 | 10,8                      | 5,5        | 2,10      | 1,95                  |
| 2195  | 2      | 3,86 | 1,69 | 0,43 | 10,0                      | 4,6        | 2,29      | 2,2                   |
| 2050  | 2      | 3,85 | 1,52 | 0,43 | 10,2                      | 4,1        | 2,54      | 2,5                   |
| 2098  | 2      | 4,04 | 1,47 | 0,57 | 11,1                      | 4,0        | 2,75      | 2,8                   |
| 2198  | 2      | 3,85 | 1,34 | 0,54 | 10,55                     | 3,7        | 2,86      | 2,8                   |
| 1469  | 2      | 5,36 | 1,80 | 0,00 | 14,7                      | 5,0        | 2,98      | 2,96                  |
| 2297  | 3      | 5,31 | 1,16 | 0,27 | 15,85                     | 3,25       | 4,58      | 4,9                   |
| 1464  | 3      | 6,40 | 1,23 | 0,00 | 19,45                     | 3,85       | 5,19      | 5,1                   |
| 2196  | 3      | 6,58 | 1,19 | 0,53 | 20,25                     | 3,35       | 5,52      | 6,0                   |
| 1461  | 3      | 6,40 | 1,15 | 0,00 | 20,25                     | 3,35       | 5,56      | 6,0                   |
| 2199  | 3      | 6,03 | 1,07 | 0,21 | 18,45                     | 3,05       | 5,63      | 6,0                   |
| 2296  | 3      | 6,02 | 1,01 | 0,64 | 18,75                     | 2,8        | 5,98      | 6,7                   |
| 2099  | 3      | 6,75 | 1,11 | 0,32 | 21,0                      | 3,1        | 6,10      | 6,8                   |
| 1450  | 4      | 7,82 | 1,18 | 0,00 | 24,5                      | 3,35       | 6,63      | 7,4                   |
| 1460  | 4      | 8,34 | 1,17 | 0,00 | 26,4                      | 3,35       | 7,10      | 7,9                   |
| 2090  | 4      | 7,81 | 1,10 | 0,00 | 20,4                      | 2,6        | 7,12      | 7,8                   |
| 2091  | 5      | 7,43 | 0,81 | 1,36 | 24,3                      | 2,3        | 9,16      | 10,6                  |
| 1441  | 5      | 6,72 | 0,73 | 0,95 | 21,9                      | 2,05       | 9,16      | 10,7                  |
| 8090  | 5      | 8,79 | 0,60 | 0,83 | 29,6                      | 1,75       | 14,65     | 16,9                  |
| 1440  | 5      | 8,79 | 0,60 | 0,83 | 29,6                      | 1,75       | 14,65     | 16,9                  |

лития и меди. Предложена новая классификация Al-Cu-Li-Mg-сплавов, которые следует разделить на пять групп, различающихся отношением долей двойной  $\delta'$ -фазы ( $W_{\delta}$ ) и тройных фаз,  $S_1$  ( $W_S$ ) или  $T_1$  ( $W_T$ ).

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (Госзадание №11.1978.2014/К «Разработка количественных методов оценки структурно-фазового и напряженного состояний сплавов Al-Cu-Li и Al-Mg-Li для обоснования и разработки сплавов и технологий, обеспечивающих повышенные характеристики прочности, упругости и фазовой стабильности основного материала и материала сварных конструкций»).*

### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 8. С. 7-17.
2. Антипов В.В. Металлические материалы нового поколения для планера перспективных изделий авиационно-космической техники // Научный электронный журнал «Новости материаловедения. Наука и техника» <http://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/31.pdf>
3. Погосян А.М. Опыт создания высококачественного наукоемкого продукта в сфере гражданского авиационного строительства // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т.18. № 2. С. 254-264.
4. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2. С. 157-167.
5. Бецофен С.Я., Ильин А.А., Осинцев О.Е., Бецофен М.С. Фазовый состав и объемные эффекты фазовых превращений в алюминиевых сплавах // Металлы. 2008. № 6. С. 70-77.
6. Бецофен С.Я., Антипов В.В., Грушин И.А., Князев М.И., Хохлатова Л.Б., Алексеев А.А. Закономерности влияния состава Al-Li сплавов на количественное соотношение  $\delta'$  ( $Al_3Li$ ),  $S_1$  ( $Al_2MgLi$ ) и  $T_1$  ( $Al_2CuLi$ ) фаз // Металлы. 2015. № 1. С. 59-66.
7. Бецофен С.Я., Антипов В.В., Князев М.И., Оглодков М.С. Исследование влияния термообработки на фазовый состав, текстуру и механические свойства сплава системы Al-Cu-Li В-1461 // Металлы. 2015. № 6. С. 77-84.
8. Бецофен С.Я., Антипов В.В., Князев М.И. Фазовый состав, текстура и анизотропия механических свойств сплавов Al-Cu-Li и Al-Mg-Li (Обзор) // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 11. С. 10-26.
9. Deschamps A., Sigli Ch., Mourey T., De Geuser F., Lefebvre W., Davo B. Experimental and modelling assessment of precipitation kinetics in an Al-Li-Mg alloy // ActaMaterialia. 2012. Vol. 60. Issue 5. Pp. 1917-1928.
10. Starke E.A. Historical development and present status of aluminum-lithium alloys // Aluminum-lithium alloys. Processing, properties and applications. 2014. Chapter 1. Pp. 3-26.
11. Jata K.V. and Singh A.K. Texture and Its Effects on Properties in Aluminum-Lithium Alloys // Processing, Properties, and Applications, 2014. Chapter 5. Pp. 139-163.

## QUANTITATIVE PHASE ANALYSIS OF Al-Cu-Li-Mg SYSTEM ALLOYS

Betsofen S.Ya.\* , Osintsev O.E.\*\* , Knyazev M.I.\*\*\* ,  
Dolgova M.I.\*\*\*\* , Kabanova Yu.A.\*\*\*\*\*

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

\* e-mail: s.betsofen@gmail.com

\*\* e-mail: osintcevoe@mati.ru

\*\*\* e-mail: kniazevmk@bk.ru

\*\*\*\* e-mail: dolgowami@gmail.com

\*\*\*\*\* e-mail: djulia.kbz@yandex.ru

### Abstract

The authors have developed a method for computing a number of intermetallic phases ( $T_1$ - and  $\delta'$ -phase) of Al-Cu-Li-Mg system alloys based on measuring  $\alpha$ -solid solution lattice periods; Vegard's law, linking up solid solution lattice period value with alloying ingredients content in it, as well as chemical and phase content

equations. Lithium content in solid solution serves herewith as variable parameter. Quaternary Al-Cu-Li-Mg system alloys quantitative phase analysis method is based on the assumption that all magnesium resides in the solid solution. This fact is considered by introducing the relevant term into equation for calculating the solid solution lattice period. This is the only difference from

the previously developed similar method for ternary alloys Al-Cu-Li. The paper shows that the developed method can be effectively used for quantitative interpretation of thermal and thermomechanical processing impact on alloys' phase content study results, as well as while Al-Cu-Li-Mg system alloys content optimization. This method allowed us to compute the relation between periods of solid solution lattice and the amount of intermetallic phases for 29 Russian and foreign industrial alloys of various generations. The paper reveals the existence of linear dependence of relative quantity of intermetallic phases in alloys ( $W_{\delta'}/W_{T_1(S_1)}$ ) from the atomic concentrations of lithium and copper (magnesium) ( $Y_{Li}^{\alpha}/Y_{Cu(Mg)}^{\alpha}$ ) in these alloys. It shows also, that relation between  $\delta'$ -phase and ternary phases is determined by the atomic concentration of lithium and copper. The authors suggested new Al-Cu-Li-Mg - alloys classification, where all alloys should be divided into five groups, differing from each other by the double  $\delta'$ -phase ( $W_{\delta'}$ ) and ternary phase shares  $S_1$  ( $W_{S_1}$ ), or  $T_1$  ( $W_{E_1}$ ) ratio.

According to this classification, all the alloys are divided into five groups. The first group includes Al-Mg-Li alloys, for which the phases ratio  $W_{\delta'}/W_{S_1} < 2$ . For the second group the ratio  $W_{\delta'}/W_{T_1}$  varies from 2 to 3; for the 3rd group - from 5 to 7; for the fourth group - from 7 to 8, and the fifth group - from 11 to 17.

**Keywords:** Al-Li alloys, quantitative phase analysis,  $\delta'$ -phase.

## References

1. Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 8, pp. 7–17.
2. Antipov V.V. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, available at: <http://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/31.pdf>
3. Pogosyan A.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol.18, no. 2, pp. 254-264.
4. Tarasov Yu.M., Antipov V.V. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 2, pp. 157–167.
5. Betsofen S.Ya., Il'in A.A., Osintsev O.E., Betsofen M.S. *Metally*, 2008, no. 6, pp. 70-77.
6. Betsofen S.Ya., Antipov V.V., Grushin I.A., Knyazev M.I., Khokhlatova L.B., Alekseev A.A. *Metally*, 2015, no. 1, pp. 59-66.
7. Betsofen S.Ya., Antipov V.V., Knyazev M.I., Oglodkov M.S. *Metally*, 2015, no. 6, pp. 77-84.
8. Betsofen S.Ya., Antipov V.V., Knyazev M.I. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2015, no. 11, pp. 10-26.
9. Deschamps A., Sigli Ch., Mourey T., De Geuser F., Lefebvre W., Davo B. Experimental and modelling assessment of precipitation kinetics in an Al–Li–Mg alloy. *Acta Materialia*, 2012, vol. 60, issue 5, pp. 1917–1928.
10. Starke E.A., Historical development and present status of aluminum–lithium alloys. *Aluminum-lithium alloys. Processing, properties and applications*, 2014, chapter 1, pp. 3-26.
11. Jata K.V. and Singh A.K. Texture and Its Effects on Properties in Aluminum–Lithium Alloys. *Processing, Properties, and Applications*, 2014, chapter 5, pp. 139-163.