

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЧАСТЬ 3

**В.В. Овчинников**

*В статье представлены основные направления совершенствования деформируемых свариваемых алюминиевых сплавов за счет их легирования скандием. Обобщены результаты цикла работ, что позволило выявить основные закономерности влияния добавки скандия на структуру и свойства алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Sc. Эти закономерности послужили основой для выбора составов новых промышленных сплавов и оптимизации температурно-временных параметров всей технологической цепочки производства (от плавки и литья до термической обработки готовых полуфабрикатов). Рассмотрено влияние скандия на свариваемость алюминиевых сплавов при сварке плавлением, а также при сварке трением с перемешиванием.*

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, сплавы системы Al-Mg-Sc, прочность, пластичность, свариваемость.

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF HIGH-TECH DEFORMABLE ALUMINUM ALLOYS FOR WELDED STRUCTURES. PART 3

**V.V. Ovchinnikov**

*This article presents the main directions of improvement of welded deformable aluminum alloys by scandium alloying. Results of the cycle of works, that revealed the main regularities of scandium additives influence on the structure and properties of aluminum alloys of a Al-Mg-Sc system. These patterns served as a basis for selecting new formulations industrial alloys and a thermal-time property optimization for the entire production chain (from the smelting and casting to thermal processing of prepared semifinished products). The influence of scandium on aluminum alloys weldability with a fusion welding has been described, as well as with a friction welding with mixing.*

**Keywords:** aluminum alloys, Al-Mg-Sc alloys, strength, ductility, weldability.

### **Введение**

Проблема разработки новых свариваемых алюминиевых сплавов, относящихся к группе термически неупрочняемых и имеющих более высокие прочностные характеристики, чем существующие промышленные сплавы системы Al-Mg, самым непосредственным образом связана с созданием новых, более совершенных образцов перспективной техники.

Наиболее распространенным материалом для изготовления большинства сварных конструкций ракет и космических аппаратов уже длительное время является алюминиевый термически неупрочняемый сплав АМг6, который производится в виде различных деформированных полу-

фабрикатов. Использование сплава АМг6 в конструкциях летательных аппаратов объясняется его несомненными достоинствами, такими как:

- удовлетворительная свариваемость, позволяющая получать сварные соединения, близкие по прочности к основному металлу;
- высокая коррозионная стойкость, позволяющая работать в агрессивных средах – в компонентах топлива и в морских условиях;
- достаточно высокая пластичность;
- высокая технологичность в металлургическом и машиностроительном производствах, связанная, в частности, с отсутствием необходимости в упрочняющей термической обработке полуфабрикатов и готовых деталей.

Вместе с тем существенным недостатком сплава АМгб является его довольно низкая прочность: гарантированный предел текучести, основная расчетная характеристика для большинства конструкций, у отожженных полуфабрикатов из сплава АМгб составляет всего лишь 120–155 МПа, в зависимости от вида полуфабриката.

Актуальной является проблема поиска таких новых сплавов, которые наряду со всеми достоинствами, присущими сплаву АМгб, имели бы более высокие прочностные свойства.

Таким образом, разработка и внедрение новых, более прочных, коррозионностойких, технологичных, термически неупрочняемых алюминиевых сплавов – это существенный вклад в решение проблемы повышения тактико-технических данных изделий и возможность создания новых типов летательных аппаратов с использованием сварки как основного метода соединений.

Внедрение таких сплавов позволит не только повысить надежность и ресурс конструкции, но и снизить ее массу и металлоемкость. Настоящая работа посвящена одному из перспективных направлений решения этих задач – легирование сплавов системы Al–Mg переходными металлами, в частности, скандием [1].

### Особенности скандия как легирующего элемента

Скандий оказывает модифицирующее влияние на структуру сплавов, способствует формированию субзеренной структуры в полуфабрикатах и обеспечивает дополнительное упрочнение [2].

Скандий, используемый в качестве легирующего элемента в алюминиевых сплавах, оказался наиболее эффективным переходным металлом из всех ранее известных применительно к данной группе сплавов – выделения фазы  $Al_3Sc$  более дисперсные (1–10 нм), чем выделения от других металлов. Это объясняется тем, что высокая стабильность дисперсных выде-

лений этой фазы в большой степени влияет на формирование ячеистой структуры деформированных полуфабрикатов.

Дисперсные частицы интерметаллида в зависимости от температурных и скоростных условий пластической деформации сплава в большей или меньшей степени повышают температуру рекристаллизации и способствуют, в результате высокотемпературных нагревов, получению нерекристаллизованной структуры и дополнительного упрочнения сплава. По мере повышения дисперсности алюминиевых фаз увеличиваются как эффект непосредственного дисперсионного твердения, так и величина структурного упрочнения.

Скандий в значительной степени стабилизирует литую ячеистую структуру, его добавка позволяет получать слитки непрерывного литья из алюминиевых сплавов с не дендритной структурой. При наличии дополнительных легирующих элементов 0,1–0,2 % (особенно Ti, Zr, Hf) массовая критическая концентрация скандия ( $\approx 0,15$ – $0,35$  %), при которой образуется мелкозернистая структура, существенно уменьшается.

Таким образом, благодаря этим свойствам добавка скандия позволяет получать слитки и сварные швы с не дендритной структурой и, как следствие этого, с повышенным комплексом эксплуатационных свойств [3]. В частности, введение скандия в сплавы позволяет увеличить прочность сплавов на 29–50 МПа [4].

На ряде сплавов системы Al–Mg–Sc выпускаемых серийно Каменск-Уральским металлургическим заводом [4], таких как 1545, 1570, 1575 и 1597, были проведены исследования, основная цель которых – определение возможности повышения механических свойств данных сплавов в пределах стандартного химического состава за счет совершенствования технологии литья, прессования и штамповки. Фактический химический состав серийных сплавов, на которых проводилось исследование, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стандартных сплавов

| Сплав   | Содержание элементов, % |      |      |      |      |      |      |      |      | Ссылка |
|---------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
|         | Al                      | Si   | Fe   | Cu   | Mn   | Mg   | Cr   | Zr   | Sc   |        |
| 1545    | Осн.                    | 0,07 | 0,12 | 0,03 | 0,3  | 4,7  | 0,02 | 0,10 | 0,21 | 7      |
| 1570    | Осн.                    | 0,08 | 0,14 | 0,02 | 0,4  | 5,94 | 0,02 | 0,07 | 0,28 | 7      |
| 1575    | Осн.                    | 0,08 | 0,14 | 0,03 | 0,50 | 5,6  | 0,17 | 0,09 | 0,24 | 6      |
| Св1597* | Осн.                    | 0,07 | 0,10 | 0,03 | 0,60 | 5,77 | 0,18 | 0,09 | 0,44 | 6      |

\* сплав для сварочной проволоки.

Для определения возможности повышения механических свойств сплавов системы Al–Mg–Sc за счет введения в сплав дополнительных упрочняющих фаз, а также для установления влияния на механические свойства сплавов температуры и степени деформации были отлиты слитки различного химического состава. Из опытных слитков были изготовлены прямоугольные прутки и трубы различных диаметров. Фактический химический состав слитков экспериментальных сплавов приведен в табл. 2.

**Влияние содержания скандия на свойства сплавов системы Al–Mg–Sc.** С целью определения влияния скандия были отпрессованы прутки из сплавов 1575 и Св1597, отличающиеся только содержанием скандия. Температура слитка при прессовании – 350–400 °С, скорость истечения – 0,5 м/мин. Механические свойства были определены на прессованных прутках без последующих термических и механических обработок (табл. 3).

Данный эксперимент показал, что увеличение содержания скандия в сплавах системы Al–Mg–Sc до уровня выше 0,25 % при содержании циркония не ниже 0,08 % не оказывает влияния на механические свойства изделий из данных сплавов. Тот же самый результат был получен и при исследовании прессованных прутков из экспериментальных сплавов.

**Влияние размера слитка и степени деформации.** В связи с тем, что легирование скандием алюминиевых сплавов системы Al–Mg приводит к тому, что при литье формируется субдендритная структура, размер зерна напрямую зависит от скорости охлаждения. При существующей системе полунепрерывного литья слитков, скорость охлаждения является функцией размера сечения слитка. Так, в слитке с круглым сечением диаметром 400 мм из сплава 1545 средний размер зерна  $d_{\text{зерен-ср}}$  составил 40,8 мкм, а в слитке диаметром 600 мм – 53,2 мкм. Из слитка диаметром 400 мм был отпрессован пруток диаметром 150 мм, а из слитка 600 мм был отпрессован прямоугольный

Таблица 2

Химический состав модельных сплавов

| № эксперимента | Химический состав сплава |      |      |      |      |      |       |       |       |       |     |               |
|----------------|--------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-----|---------------|
|                | Mg                       | Mn   | Sc   | Zr   | Zn   | Cr   | Cu    | V     | Fe    | Si    | Ni  | другие        |
| 1              | 6,3                      | 1,0  | 0,25 | 0,09 | 0,8  | 0,12 | 0,18  | 0,014 | 0,18  | 0,07  | –   | Be 0,0005     |
| 2              | 6,52                     | 0,97 | 0,25 | 0,12 | 0,57 | 0,12 | 0,18  | 0,017 | 0,058 | 0,04  | –   | Be; Ce 0,0005 |
| 3              | 5,92                     | 0,76 | 0,41 | 0,14 | 0,32 | 0,09 | 0,096 | 0,012 | 0,056 | 0,037 | –   | Be            |
| 4              | 6,3                      | 0,89 | 0,24 | 0,12 | 0,62 | 0,11 | 0,20  | 0,012 | 0,058 | 0,04  | –   | Be; Ca 0,15   |
| 5              | 6,7                      | 0,15 | 0,25 | 0,10 | 0,04 | 0,13 | 0,025 | –     | 0,74  | 0,15  | 1,0 | Be            |
| 6              | 7,1                      | 0,02 | 0,22 | 0,12 | 1,1  | 0,02 | 0,18  | –     | 0,8   | 0,21  | 1,0 | Be            |
| 7              | 7,8                      | 0,21 | 0,2  | 0,12 | 1,0  | 0,02 | 0,13  | –     | 0,7   | 0,16  | 1,0 | Be; Ca 0,05   |
| 8              | 6,6                      | 0,84 | 0,21 | 0,11 | 0,54 | 0,11 | 0,01  | –     | 0,05  | 0,03  | –   | Be. Ag 0,56   |
| 9              | 6,5                      | 1,0  | 0,21 | 0,09 | 0,58 | 0,13 | 0,19  | –     | 0,05  | 0,03  | –   | Be. Ag 0,69   |
| 10             | 6,2                      | 0,8  | 0,27 | 0,10 | 0,5  | 0,09 | 0,2   | 0,003 | 0,14  | 0,07  | –   | –             |
| 11             | 6,7                      | 0,2  | 0,28 | 0,11 | 0,6  | 0,13 | 0,05  | 0,005 | 0,8   | 0,22  | 0,9 | –             |

Таблица 3

Средние значения механических свойств прессованных прутков из сплавов 1575 и Св1597

| Сплав  | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ |
|--------|------------------|----------------------|--------------|-------------------------|
| 1575   | 419              | 279                  | 19           | 0,66                    |
| Св1597 | 414              | 280                  | 16,5         | 0,68                    |

Примечание.  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести;  $\delta$  – относительное удлинение.

пруток сечением 155×235 мм. Механические свойства отпрессованных прутков представлены в табл. 4. Очевидно, что в данном случае основное влияние на механические свойства оказала степень деформации, в то же время целесообразно стремиться к минимально возможному размеру зерна посредством оптимизации размера слитка.

**Влияние температуры и степени деформации.** С целью выявления зависимости температуры и степени деформации на свойства прессованных полуфабрикатов и сплава 1570 были отпрессованы трубы различных диаметров. Механические свойства отпрессованных труб, без дополнительных термообработок, из сплава 1570 приведены в табл. 5. Образцы 1 и 2 взяты из разных участков одной и той же трубы, имеющей переменное сечение. Результаты показывают, что при прочих равных условиях, увеличение степени деформации позволяет повысить механические свойства труб, в то же время повышение температуры деформации выше 400 °C ведет к их снижению.

**Влияние повторной деформации.** В связи с имеющимися данными о влиянии деформации на свойства сплавов системы Al–Mg–Sc, представляет интерес вопрос о влиянии на свойства данных сплавов повторной де-

формации. В связи с этим был проведен эксперимент по изготовлению штамповок из сплава 1570 непосредственно из слитка, а также из предварительно отпрессованного прутка. Результаты исследования показали, что механические свойства штамповок, изготовленных непосредственно из слитка ниже, чем свойства предварительно отпрессованного прутка (табл. 6). Это связано с менее благоприятной схемой деформации при изготовлении штамповки. В то же время изготовление штамповки из предварительно отпрессованной заготовки позволяет получить более высокие механические свойства.

**Исследование возможности повышения свойств сплавов системы Al–Mg–Sc дополнительным легированием Cu, Mn, Cr, Ni, Fe, Ag.** Экспериментальные сплавы составов 1–9 (см. табл. 2) были отлиты в слитки диаметром 260 мм. Из отлитых слитков были отпрессованы прямоугольные прутки сечением 31,8×139,7 мм. Для определения возможности повышения свойств за счет деформации технологию прессования (температуру и скорость прессования) варьировали в определенных пределах. Из полученных прутков были изготовлены образцы для испытаний и определены их механические и коррозионные свойства.

Таблица 4

Механические свойства прессованных прутков из сплава 1545

| Диаметр слитка, мм | $d_{\text{зерн-ср}}, \text{ мкм}$ | $\lambda$ | $\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$ | $\delta, \%$ |
|--------------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------------------------|--------------|
| 400                | 40,8                              | 7,1       | 390                              | 270                         | 18,0         |
| 600                | 53,2                              | 4,3       | 375                              | 250                         | 20,5         |

Примечание.  $\lambda$  – коэффициент вытяжки.

Таблица 5

Механические свойства прессованных труб из сплава 1570  
в зависимости от температуры и коэффициента вытяжки

| № образца | $T, ^\circ\text{C}$ | $\lambda$ | $\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$ | $\delta, \%$ |
|-----------|---------------------|-----------|----------------------------------|-----------------------------|--------------|
| 1         | 380                 | 9,7       | 428–447                          | 292–320                     | 16,5–17,5    |
| 2         | 380                 | 22,2      | 429–454                          | 303–336                     | 16,5–21,5    |
| 3         | 405                 | 140       | 383–405                          | 268–291                     | 17,5–21,0    |

Таблица 6

Механические свойства штамповок из сплава 1570

| Вариант штамповки   | $\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$ | $\delta, \%$ |
|---------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------|
| штамповка из слитка | 383–405                          | 268–291                     | 17,5–21,0    |
| пруток из слитка    | 429–454                          | 303–336                     | 16,5–21,5    |
| штамповка из прутка | 428–447                          | 292–320                     | 16,5–17,5    |

Поскольку основная цель экспериментов заключалась в получении максимально возможных улучшенных свойств металла крупногабаритных труб, полученные прутки не подвергались последующей правке растяжением, либо эта правка проводилась с минимальным остаточным напряжением (не более 1 %). На втором этапе (эксперименты 10–11) были отлиты полые слитки АЕ610×370 мм и АЕ745×370 мм. Из них были отпрессованы трубы сечением АЕ430,6×37,5 мм. Результаты представлены в табл. 7.

Проведенные эксперименты показали, что введение меди и цинка, при одновременном повышении содержания железа, по сравнению

со сплавом 1570 (эксперименты 1, 2, 4) не приводит к заметному повышению механических свойств. Повышение содержания скандия до 0,41 % при одновременном повышении содержания циркония до 0,14 % (эксперимент 3) не дало ожидаемого эффекта. Аналогичный результат был получен и по результатам прессования сплава Св1597 (см. табл. 3).

В то же время данный химический состав позволил получить максимально высокие коррозионные свойства. Более высокие свойства в данном эксперименте удалось получить при правке растяжением с остаточным напряжением 3 %. Введение фазы железо-никель позволило несколько повысить механические свойства

Таблица 7

**Технология прессования, механические свойства и коррозионная стойкость  
экспериментальных сплавов системы Al–Mg–Sc**

| №<br>эк-<br>peri-<br>мента | Технология прессования |                                                     |                                   |                                                  | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | Общая<br>коррозия,<br>мм/год |
|----------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|------------------|----------------------|------------------------------|
|                            | $\lambda$              | Температура<br>слитка/температура<br>контейнера, °C | Скорость<br>прессования,<br>м/мин | Правка<br>растяжением<br>$\varepsilon_{ост}$ , % |                  |                      |                              |
| 1                          | 12                     | 430/420                                             | 0,3–1,5                           | 1                                                | 428, 428         | 272; 283             |                              |
|                            |                        | 380/400                                             | 0,3–1,5                           | 1                                                | 429, 429         | 277; 302             |                              |
|                            |                        | 330/400                                             | 0,3–1,5                           | 1                                                | 440, 433         | 282; 291             |                              |
| 2                          | 12                     | 380/400                                             | 0,2–0,8                           | –                                                | 425              | 277                  | 0,2607                       |
|                            |                        | 325/380                                             | 0,1–1,0                           | 1                                                | 430              | 279                  | 0,2165                       |
| 3                          | 12                     | 340/380                                             | 0,2–0,8                           | 1                                                | 420              | 252                  | 0,0007                       |
|                            |                        | 290/380                                             | 0,05–0,2                          | 1                                                | 430              | 278                  | 0,0053                       |
|                            |                        | 270/380                                             | 0,1–0,4                           | 1                                                | 415              | 271                  | 0,0096                       |
|                            |                        |                                                     |                                   | 3                                                | 440              | 321                  | –                            |
| 4                          | 12                     | 380/400                                             | 0,2–1,0                           | 1                                                | 420              | 276                  | 0,2835                       |
|                            |                        | 310/380                                             | 0,2–1,0                           | –                                                | 425              | 283                  | 0,2827                       |
|                            |                        | 275/380                                             | 0,05–0,4                          | 1                                                | 425              | 280                  | 0,3219                       |
| 5                          | 12                     | 400/400                                             | 0,5                               | –                                                | 435              | 305                  | 1,2752                       |
|                            |                        | 400/400                                             | 1,0                               | –                                                | 405              | 255                  | 1,1029                       |
|                            |                        | 350/400                                             | 1,1                               | –                                                | 415              | 315                  | 1,1125                       |
| 6                          | 12                     | 394/400                                             | 0,7                               | –                                                |                  | 279                  |                              |
|                            |                        | 300/380                                             | 1,0                               | –                                                |                  | 302                  |                              |
| 7                          | 12                     | 395/400                                             | 0,1                               | –                                                |                  | 250                  |                              |
|                            |                        | 310/380                                             | 1,0                               | –                                                |                  | 255                  |                              |
|                            |                        | 295/380                                             | 0,9                               |                                                  |                  | 266                  |                              |
| 8                          | 12                     | 390/400                                             | 0,5                               | –                                                | 412              | 270                  |                              |
|                            |                        | 370/400                                             | 1,0                               | 1,0                                              | 418              | 275                  |                              |
| 9                          | 12                     | 370/400                                             | 0,8                               | 2,0                                              | 420              | 345                  |                              |
| 10                         | 4,85                   | 340/400                                             | 0,5                               | –                                                |                  | 275                  |                              |
|                            |                        | 325/400                                             | 0,1                               | –                                                |                  | 280                  |                              |
| 10                         | 8,41                   | 400/400                                             | 0,55                              | –                                                |                  | 241                  |                              |
| 11                         | 4,85                   | 325/400                                             | 0,4                               | –                                                |                  | 295                  |                              |
|                            |                        | 330/400                                             | 0,5                               | –                                                |                  | 290                  |                              |
| 11                         | 8,41                   | 405/400                                             | 0,4                               | –                                                |                  | 246                  |                              |

(эксперименты 5 и 6), однако в этом случае значительно понизилась коррозионная стойкость сплава. При повышении содержания магния в сплаве Al–Mg–Sc с добавкой фазы Fe–Ni до 7,8 % [5] механические свойства прутков понизились. Вероятно, это связано с выделением на границе зерен избыточной фазы AlMg.

Добавка хрома в составы 1–5 (см. табл. 2) никак не сказалась на свойствах сплавов. В составы 4 и 7 был введен кальций, который повышает пластичность сплавов систем Al–Mg и Al–Mg–Si [6]. В составах 8 и 9 была предпринята попытка повысить механические свойства за счет стабилизации фазового состава сплава путем введения в него серебра. Без правки растяжением свойства остались на прежнем уровне. Однако при правке растяжением с остаточным напряжением 2 % предел текучести поднялся на 25 % и достиг 345 МПа.

Для изготовления крупногабаритных труб (эксперименты 10, 11) были выбраны химические составы, показавшие наилучшее соотношение механических свойств. При прессовании труб из слитка АЕ610×370 мм удалось максимально приблизиться к поставленной цели – достичь предел текучести в прессованном состоянии в 300 МПа. К сожалению, при прессовании слитка АЕ45×370 мм не хватило усилия пресса (максимальное усилие пресса  $12 \cdot 10^6$  Н). Для повышения пластичности слитка пришлось поднять его температуру выше 400 °С, что в итоге привело к ухудшению механических свойств.

**Модернизация сплава 01570 применительно к созданию летательных аппаратов.** Требованиям авиационно-космической промышленности в большей мере удовлетворяет высокопрочный термически неупрочняе-

мый алюминиевый сплав 01570. Сплав 01570 системы Al–Mg–Sc был разработан Всероссийским институтом легких сплавов (ВИЛС) в 70-х гг. прошлого столетия. В нем содержится 5,8–6,8 % Mg; 0,3–0,5 % Sc; 0,1–0,25 % Mn; 0,05–0,15 % Zr, а также добавки других элементов. Сплав обладает высокой коррозионной стойкостью, прочностью и хорошей свариваемостью.

В отожженном состоянии сплав предназначен для изготовления как сварных, так и бесшовных конструкций, работающих в диапазоне температур от –196 °С до +156 °С, и имеет во всех видах полуфабрикатов более высокие, чем у сплавов системы Al–Mg, прочностные характеристики (табл. 8).

Сплав 01570 не является жаропрочным: при повышении температуры испытаний он быстро разупрочняется. Вместе с тем известно, что сплав является природно сверхпластичным, т.е. деформированные полуфабрикаты из него могут подвергаться сверхпластической формовке без специальной подготовки структуры, что в свою очередь, позволяет получать изделия сложной формы [7].

По пределу текучести полуфабрикаты из сплава системы Al–Mg–Sc превосходят аналогичные полуфабрикаты из сплава АМг6 в 1,5–2,0 раза в зависимости от вида полуфабриката. Применение сплава 01570 вместо сплава АМг6 дает выигрыш в массе до 20 %.

В настоящее время имеется достаточно большой опыт применения сплава 01570 в изделиях ракетно-космической техники разового использования. Однако для изготовления герметичных отсеков космических аппаратов многоразового использования, кроме высо-

Таблица 8

Сравнительные характеристики сплавов 01570 и АМг6

| Характеристика                                                                 | Сплав 01570 | Сплав АМг6 |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|
| Система сплава                                                                 | Al–Mg–Sc    | Al–Mg      |
| Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>                                           | 2,65        | 2,64       |
| Модуль упругости $E$ , МПа                                                     | 69 580      | 69 580     |
| Предел прочности $\sigma_B$ , МПа                                              | 370–390     | 313        |
| Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа                                          | 245         | 157        |
| Относительное удлинение $\delta$ , %                                           | 15          | 15         |
| Удельная прочность $\sigma_B/\rho$ , км                                        | 14,5        | 11,9       |
| Коэффициент прочности сварного шва $\sigma_{B \text{ св. соедин.}} / \sigma_B$ | 0,85–0,95   | 0,9–0,95   |

кой прочности и пластичности, сплав системы Al–Mg–Sc должен обладать высокой статической и динамической трещиностойкостью, обеспечивающей неоднократное использование изделия, т.е. подход к выбору материала должен быть таким же, как к материалу планера самолета [8].

Сплав 01570 имеет низкую сопротивляемость развитию усталостной трещины, что делает его непригодным для многократного использования [4].

Необходимый комплекс механических и эксплуатационных свойств может быть обеспечен за счет корректировки химического состава сплава 01570. Было выбрано оптимальное содержание основных легирующих элементов (снижение содержания Mg и Mn, снижение верхнего предела Sc), малых добавок (Be, Ce) и увеличена чистота по примесям, главным образом, Fe и Si ( $\Sigma\text{Fe}+\text{Si} \leq 0,12$ ).

Сплаву присвоена марка 1570С и выпущены технические условия (ТУ) на его химический состав. Особенностью сплава 1570С является низкое суммарное содержание Fe+Si, которое в промышленных условиях может быть обеспечено только при высокой чистоте шихтовых материалов, в первую очередь, первичного алюминия (табл. 9).

Слиткиполуфабрикаты в отожженном состоянии имеют нерекристаллизованную структуру и хорошее сочетание прочностных и пластических свойств. В работе [4] показано, что сплав 1570С обладает удовлетворительной технологической пластичностью при холодной деформации, и подтверждена возможность изготовления деталей сложной формы с промежуточным отжигом.

Наиболее высокой прочностью обладают листы ( $\sigma_B = 450$  МПа) и тонкостенные профили ( $\sigma_B = 410$  МПа). Прочностные свойства полуфабрикатов больших сечений – плит и раскатных колец – ниже ( $\sigma_B = 380$  МПа).

Листы отличаются высоким сопротивлением малоциклового усталости, низкой чув-

ствительностью к концентратору напряжений (эффективный коэффициент концентрации напряжений  $K_\sigma \approx 1,4$ ) и высоким сопротивлением развитию трещин  $\Delta K$  (рис. 1).

Установлено, что ограниченный предел выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов при пульсирующем нагружении образцов из плиты сплава 1570С толщиной 35 мм равен 200 МПа (рис. 2) [8].

На Каменск-Уральском металлургическом заводе (КУМЗ) были изготовлены промышленные партии полноразмерных полуфабрикатов из сплава 1570С. Отработаны технологии литья и изготовления плоских слитков сечением  $300 \times 1100$  мм. Химический состав полученных

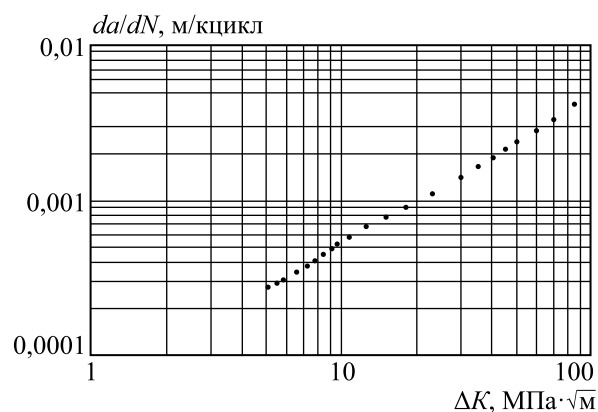


Рис. 1. Диаграмма циклической трещиностойкости листа толщиной 2,5 мм из сплава 1570С [8]:

$a$  – размер трещины,  $N$  – количество циклов

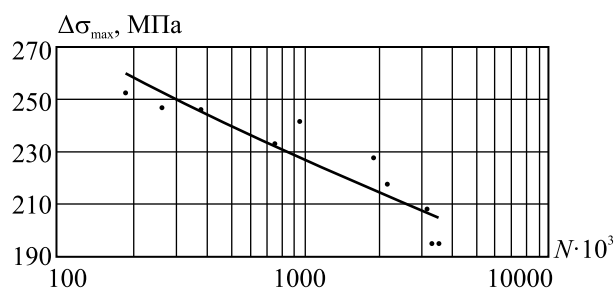


Рис. 2. Диаграмма усталостной прочности сплава 1570С (плита толщиной 35 мм) [8]:

$\sigma_{\text{max}}$  – максимальное напряжение

Таблица 9

Химический состав сплавов 01570 (по ТУ 1-809-420-2007) и 1570С (по ТУ 1-809-1177-2009)

| Сплав | Массовая доля легирующего элемента, масс. % |         |           |           |           |              |               |                                               |     |        |
|-------|---------------------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|--------------|---------------|-----------------------------------------------|-----|--------|
|       | Mg                                          | Mn      | Sc        | Zr        | Ti        | Be           | Ce            | Fe                                            | Si  | Прочие |
| 01570 | 5,3–6,3                                     | 0,2–0,6 | 0,17–0,35 | 0,05–0,15 | 0,01–0,06 | 0,0002–0,005 | –             | 0,3                                           | 0,2 | 0,1    |
| 1570С | 5,0–5,6                                     | 0,2–0,5 | 0,18–0,26 | 0,05–0,12 | 0,01–0,03 | 0,0002–0,005 | 0,0002–0,0009 | $\Sigma_{\text{Fe}+\text{Si}} \leq 0,05–0,12$ |     | 0,1    |

слитков полностью соответствовал требованиям ТУ 1-809-1177-2009 на химический состав алюминиевого сплава 1570С как по основным легирующим элементам, так и по примесям.

Отработаны режимы термической и термо-механической обработки сплава 1570С в процессе изготовления – от гомогенизации слитков до получения конечных полуфабрикатов, выпущены технические условия на плиты (ТУ 1-804-505-2012) и листы (ТУ 1-804-506-2012) из алюминиевого сплава 1570С. Полученные полуфабрикаты имели следующие размеры: плиты 30×1800×2000 и 35×1800×2000 мм, листы (2,5–4,0)×1500×3000 мм.

Крупногабаритные полуфабрикаты из сплава 1570С по механическим характеристикам превосходят аналогичные полуфабрикаты из сплава АМг6. Для листов и плит предел прочности при растяжении  $\sigma_B = 375\text{--}400$  МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2} = 245\text{--}300$  МПа и относительное удлинение  $\delta = 15\text{--}20$  %.

Были изготовлены фрагменты конструкции корпуса гермокабины командного отсека возвращаемого аппарата пилотируемого транспортного корабля нового поколения: сектор конической обечайки с иллюминатором (рис. 3) и сектор конической обечайки с крышкой входного люка.

В процессе изготовления штатных элементов конической обечайки были отработаны технологические процессы механической обработки (вафельная оболочка), гибки (придание конусности), термофиксации (для предотвращения негативного влияния внутренних напряжений при механической обработке).

Листы из сплава 1570 обладают природной сверхпластичностью. Имея мелкозернистую структуру, они могут подвергаться большим пластическим деформациям без специальной подготовки. На практике это используется для получения заготовок деталей сложных форм при применении менее мощного (в 2–3 раза) прессового оборудования для их изготовления. Новый сплав, как и сплав АМг6, обладает достаточным сопротивлением коррозии во влажной атмосфе-

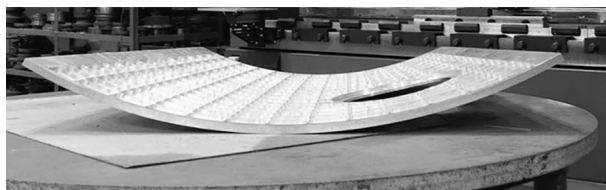


Рис. 3. Элемент конической обечайки (с вафельной оболочкой)

ре и в контакте с компонентами ракетного топлива. Важным достоинством сплава является способность сильно упрочняться при холодной деформации. Благодаря высокой свариваемости и хорошему сочетанию прочностных, пластических и коррозионных свойств, сплав 1570 находит применение в ракетной технике и имеет определенные перспективы в самолетостроении, а также может быть использован для сварных рамных конструкций автомобиля.

На базе сплава 1570 разработан экономно легированный сплав 1575, отличающийся пониженным содержанием скандия. Предлагается использовать его в виде экструдированных профилей в тяжело нагруженных строительных конструкциях для ферм, мостов, мачт, опор линий электропередач, в автомобильном и железнодорожном транспорте.

Сплав 01570 в горячепрессованном состоянии обладает высокой структурной стабильностью. Одночасовой нагрев образцов при 500 °С не приводит к появлению в структуре рекристаллизованных зерен. Начало рекристаллизации наблюдается при 4-часовом нагреве при 500 °С, а при более высокой температуре (525–550 °С) процессы рекристаллизации развиваются более интенсивно [10].

Мелкие рекристаллизованные зерна в структуре образцов, предварительно отожженных при 320 °С и холоднодеформированных на 40 %, наблюдаются после десятичасового нагрева при температуре 400 °С.

Повышение температуры предварительного отжига до 450 °С стимулирует развитие процессов рекристаллизации, которые отмечаются уже после дополнительного 4-часового нагрева при 400 °С. Одночасовой нагрев холоднодеформированных образцов при 525 °С приводит к существенному укрупнению рекристаллизованных зерен.

Наблюдаемое понижение температуры начала рекристаллизации в холоднодеформированных образцах, подвергнутых предварительному отжигу при более высокой температуре (450 °С), по-видимому, связано с тем, что при данной температуре отжига происходит некоторое увеличение межчастичного расстояния и размеров частиц  $Al_3$  (Sc, Zr), являющихся эффективными барьерами и препятствующих протеканию процессов рекристаллизации [11–13].

Результаты измерения твердости образцов, отожженных при 320 °С и деформированных при 20 °С со степенью деформации 30 %



и подвергнутых дополнительным нагревам на 400–550 °С, подтверждают, что наиболее интенсивное разупрочнение сплава 01570 начинается с температуры 450 °С.

Повышение температуры предварительно-го отжига выше 320 °С хотя и повышает запас пластичности, однако уменьшает термическую стабильность структурного состояния, получаемого при холодной деформации. Кроме того, по данным работ [13, 14] температуры отжига выше 335 °С неблагоприятно сказывается на коррозионной стойкости алюминий-магние-вых сплавов.

#### Микроструктура и механические свой-ства ультрамелкозернистого алюминиевого сплава 1570С после прокатки.

Увеличение прочности алюминиевых сплавов позволяет повысить их конкурентоспо-собность и расширить область применения. Известно, что характер зеренной структуры, плотность дислокаций и фазовый состав оказы-вают существенное влияние на механические свойства сплавов, то есть повышение служеб-ных свойств возможно за счет формирования в металлах определенной структуры и свойств. Самым экономичным методом повышения

свойств материала является прокатка с больши-ми степенями обжатия, но для высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Sc–Zr этот метод является не технологичным, что свя-зано с высоким пределом текучести и низким ресурсом пластичности данных сплавов.

Возможным решением этой проблемы яв-ляется предварительная подготовка структу-ры сплавов к последующей прокатке, путем формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) микроструктуры методом интенсивной пла-стической деформации (ИПД). Термомехани-ческая обработка позволяет повысить техно-логическую пластичность сплавов, что дает возможность получения проката. Наиболее рас-пространенным методом ИПД для формирова-ния однородной ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры является равноканальное угловое прессование (РКУП).

Плита сплава 1570С была подвергнута РКУП при температуре 300 °С до истинной степени деформации ~12 %. В результате в сплаве была сформирована однородная равноосная рекристал-лизованная микроструктура со средним размером зерен  $d_{\text{зерен}}$  и кристаллитов  $d_{\text{кристал}}$  ~0,9 и ~0,6 мкм, соответственно (рис. 4, а и 4, б). Плотность дисло-каций  $\rho$  составила  $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$  (табл. 10).

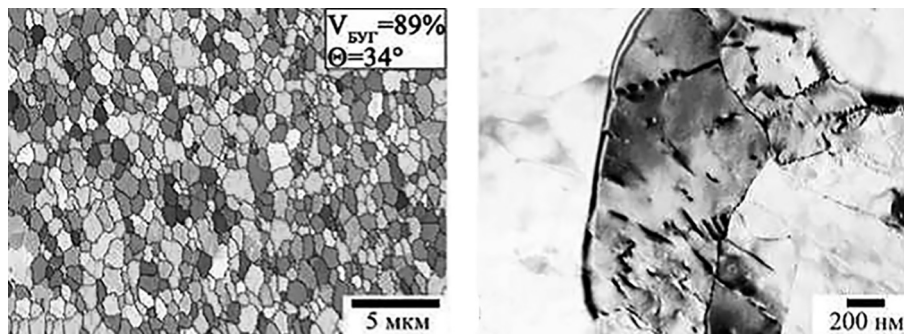


Рис. 4. Микроструктура сплава 1570С в УМЗ состоянии:

а – карта ориентировок; б – просвечивающая электронная микроскопия;  
 $V_{\text{БУГ}}$  – объем большеугловых границ;  $\Theta$  – угол большеугловых границ

Таблица 10

#### Влияние РКУП и холодной прокатки на микроструктуру сплава 01570С

| Состояние                                                                               | $d_{\text{зерен}}^*$ , мкм | $K$ , % | $d_{\text{кристал}}$ , нм | $\rho$ , $\text{м}^{-2}$ | $\Theta$ , ° | $V_{\text{БУГ}}$ , % |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------|---------------------------|--------------------------|--------------|----------------------|
| РКУП $\varepsilon \sim 12\%$                                                            | 0,9                        | –       | 600                       | $5 \cdot 10^{13}$        | 38           | 93                   |
| РКУП $\varepsilon \sim 12\%$ + холодная прокатка (ХП) со степенью деформации 80 %       | 1/0,3                      | 3,3     | 110                       | $6 \cdot 10^{14}$        | 34           | 85                   |
| РКУП $\varepsilon \sim 12\%$ + изотермическая прокатка (ИП) со степенью деформации 80 % | 1,3/0,9                    | 1,4     | 520                       | $7 \cdot 10^{13}$        | 34           | 84                   |

\*Числитель и знаменатель соответствуют продольному и поперечному направлениям, соответственно  
 $K$  – коэффициент трещинообразования.

В дальнейшем заготовка была подвергнута прокатке при комнатной температуре до степени деформации  $\sim 80\%$ . Исследования методом *EBSD*-анализа образца после холодной прокатки показали, что зерна приобрели вытянутую форму (рис. 5, а), средний размер зерен в продольном направлении составил  $\sim 1$  мкм, а в поперечном около 0,3 мкм. Коэффициент формы равен 3,3. По данным просвечивающей электронной микроскопии средний размер кристаллитов уменьшился до  $\sim 110$  нм. Плотность дислокаций значительно возросла и составила  $\sim 6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$  (табл. 10).

После изотермической прокатки микроструктура сплава представлена практически равноосными зернами со средним размером  $\sim 1,3$  и  $\sim 0,9$  мкм в продольном и поперечном направлениях, соответственно (см. рис. 5, б). Размер кристаллитов, по сравнению с образцом после РКУП, уменьшился до  $\sim 520$  нм. Плотность дислокаций незначительно возросла и составила  $\sim 7 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$  (табл. 11) [15].

Механические испытания образцов при комнатной температуре показали, что в результате холодной прокатки предел текучести значительно возрастает на 200 МПа, тогда как предел прочности – на 155 МПа. Схожим образом изменяется и микротвердость. Холодная прокатка РКУП-образцов снижает пластичность сплава в 8 раз. В результате изотермической прокатки значения параметров прочности возросли незначительно (см. табл. 11),

однако пластичность уменьшилась практически в 3 раза.

Холодная прокатка ультрамелкозернистого сплава позволяет дополнительно измельчить микроструктуру, средний размер зерен и кристаллитов (по сравнению с РКУП) уменьшается в три и шесть раз, соответственно. Также холодная прокатка приводит к значительному возрастанию плотности дислокаций. Холоднокатаные УМЗ-листы демонстрируют высокие показатели статической прочности (предел текучести составил  $\sim 555$  МПа, предел прочности  $\sim 575$  МПа).

После изотермической прокатки не происходит значительных изменений в микроструктуре сплава. Прочностные свойства меняются слабо (предел текучести составил  $\sim 370$  МПа, предел прочности  $\sim 430$  МПа), но пластичность сокращается практически в 3 раза.

Существенное возрастание прочности сплава в большей степени связано с увеличением плотности дислокаций и в меньшей с уменьшением размера зерен. Однако измельчение зерна является необходимым условием для сохранения достаточной пластичности этого материала.

#### Свариваемость сплавов системы Al–Mg–Sc.

При сварке плавлением Проведены исследования показателей свариваемости, механических свойств сварных соединений и особенностей технологий сварки плавлением алюминиевых сплавов со скандием в сравнении с ранее известными сплавами. Химический состав ис-

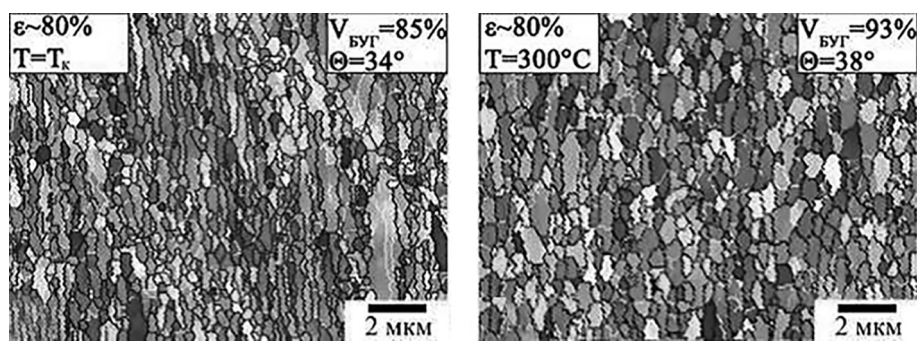


Рис. 5. Карты ориентировок сплава 1570С после холодной (а) и изотермической (б) прокатки со степенью обжатия 80 %

Таблица 11

#### Влияние РКУП и холодной прокатки на механические характеристики сплава 01570С

| Состояние                           | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | НВ 0,1 |
|-------------------------------------|----------------------|------------------|--------------|--------|
| РКУП $\varepsilon \sim 12$          | 355                  | 420              | 28           | 128    |
| РКУП $\varepsilon \sim 12$ +ХП-80 % | 555                  | 575              | 3,5          | 169    |
| РКУП $\varepsilon \sim 12$ +ИП-80 % | 370                  | 430              | 10,5         | 129    |

следованных сплавов приведен в табл. 12, а механические свойства основного металла в табл. 13. Исследование свариваемости проводили по стандартной методике (крестовая проба, проба «рыбий скелет» и проба МВТУ) на установке ЛТП 1-6). Результаты испытаний на свариваемость приведены в табл. 14.

Анализ данных табл. 13 показывает, что показатель весовой эффективности для сплавов 01545, 01545К, 1570 и 01570С примерно в 2–2,5 раза выше, чем для широко применяемого сплава АМг6. При температуре –253 °С по всему комплексу технологических свойств сплав 01545К не имеет себе равных среди известных алюминиевых сплавов.

Данные в табл. 14 свидетельствуют о том, что коэффициент трещинообразования по крестовой пробе для всех сплавов системы

Al–Mg–Sc мало зависит от марки присадочной проволоки и находится на низком уровне даже при сварке без присадочной проволоки. Критическая скорость деформации при сварке с присадочной проволокой находится на высоком уровне (6–7,0 мм/мин).

Таким образом, все сплавы системы Al–Mg–Sc можно использовать в сложных пространственных конструкциях, как с присадочными проволоками, так и без них.

Механические свойства сварных соединений приведены в табл. 15. Предел прочности сварных соединений из сплавов 01545 и 01570 при температуре испытаний 20 °С на 10–35 % выше, чем для сплавов 1460 и 1151.

При температуре испытаний –196 °С предел прочности для сплавов 01545 и 01570 на 20–37 % выше, чем для сплавов 1460 и 1151, а при темпе-

Таблица 12

## Химический состав исследованных алюминиевых сплавов со скандием

| Марка сплава | Содержание элементов, масс. % |      |      |      |      |      | Примеси, не более |      |
|--------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|-------------------|------|
|              | Mg                            | Sc   | Ti   | Zr   | Mn   | Cu   | Fe                | Si   |
| 01515        | 1,3                           | 0,21 | 0,01 | 0,01 | 0,3  | 0,09 | 0,18              | 0,1  |
| 01523        | 2,8                           | 0,20 | 0,02 | 0,1  | 0,3  | 0,1  | 0,15              | 0,12 |
| 01545        | 4,6                           | 0,25 | 0,08 | 0,1  | 0,35 | 0,09 | 0,25              | 0,12 |
| 1545К        | 4,48                          | 0,29 | 0,01 | 0,08 | 0,24 | 0,07 | 0,11              | 0,05 |
| 1570         | 6,1                           | 0,28 | 0,06 | 0,1  | 0,35 | 0,1  | 0,15              | 0,1  |
| 01570С       | 5,2                           | 0,22 | 0,02 | 0,08 | 0,2  | 0,15 | 0,07              | 0,05 |

Примечание: 1. Приведен среднemarkочный химический состав сплавов

Таблица 13

## Типичные механические свойства алюминиевых сплавов

| Марка сплава | T, °C | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\alpha$ , град | KCU, Дж/см <sup>2</sup> | $\sigma_{0,2} \cdot E^{0,66} / \gamma$ |
|--------------|-------|------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------------------|
| 01515        | 20    | 270              | 200                  | 125             | 32                      | 2,69                                   |
| 01523        | 20    | 290              | 240                  | ПО              | 30                      | 3,23                                   |
| 01535        | 20    | 360              | 280                  | 105             | 28                      | 3,86                                   |
| 01545        | 20    | 395              | 310                  | 90              | 27                      | 4,17                                   |
| 01545К       | 20    | 390              | 300                  | 105             | 30                      | 4,05                                   |
|              | -196  | 490              | 350                  | –               | –                       | 4,7                                    |
|              | -253  | 630              | 420                  | –               | –                       | 5,6                                    |
| 01570        | 20    | 440              | 325                  | 88              | 28                      | 4,36                                   |
|              | -196  | 535              | 380                  | –               | –                       | 5,12                                   |
|              | -253  | 610              | 410                  | –               | –                       | 5,52                                   |
| 01570С       | 20    | 415              | 320                  | 97              | 31                      | 4,31                                   |
|              | -196  | 510              | 370                  | –               | –                       | 5,0                                    |
| АМг6         | 20    | 335              | 165                  | 100             | 18                      | 2,15                                   |
|              | -196  | 470              | 185                  | –               | –                       | 2,4                                    |

Примечания: 1. T – температура сплава.

2. Данные по сплаву АМг6 приведены для сравнения.

3. Приведены средние данные по результатам испытаний пяти образцов.

Таблица 14

Показатели свариваемости алюминиевых сплавов

| Марка сплава | Марка присадочной проволоки | K, %                 |                 | A <sub>кр</sub> , мм/мин |
|--------------|-----------------------------|----------------------|-----------------|--------------------------|
|              |                             | Проба «рыбий скелет» | Крестовая проба |                          |
| 01515        | Без присадки                | 6                    | 4               | 5,2                      |
|              | Св1515                      | 5                    | 2               | 5,9                      |
| 01523        | Без присадки                | 7                    | 6               | 5,8                      |
|              | Св1523                      | 4                    | 2               | 6,6                      |
| 01535        | Без присадки                | 4                    | 3               | 7,1                      |
|              | Св1571                      | 2                    | 0               | 7,7                      |
| 01545        | Без присадки                | 5                    | 5               | 6,9                      |
|              | Св1571                      | 5                    | 0               | 7,0                      |
| 01545K       | Без присадки                | 4                    | 7               | 7,1                      |
|              | Св1571                      | 2                    | 2               | 7,3                      |
| 01570        | Без присадки                | 10                   | 7               | 6,0                      |
|              | Св1571                      | 8                    | 2               | 6,8                      |
| 01570C       | Без присадки                | 8                    | 5               | 6,5                      |
|              | Св1571                      | 6                    | 0               | 7,7                      |
| AMg6         | Без присадки                | 25                   | 19              | 4,5                      |
|              | СвAMg6                      | 8                    | 5               | 5,5                      |

Примечание. A<sub>кр</sub> – критическая скорость деформации, мм/мин

Таблица 15

Типичные механические свойства сварных соединений:  
автоматическая аргонодуговая сварка; швы с усилением и проплавом

| Марка сплава | T, °C | $\sigma_b$ , МПа | $\alpha$ , град. | KCU, Дж/см <sup>2</sup> |        | $\frac{\sigma_{Bc.c.}}{\sigma_{Bo.m.}}$ | Марка при садочной проволоки |
|--------------|-------|------------------|------------------|-------------------------|--------|-----------------------------------------|------------------------------|
|              |       |                  |                  | по шву                  | по зтв |                                         |                              |
| 01515        | 20    | 260              | 130              | 37,5                    | 28,8   | 0,96                                    | Св1515                       |
| 01523        | 20    | 275              | 128              | 36                      | 29,4   | 0,95                                    | Св1523                       |
| 01545K       | 20    | 390              | 125              | 38,7                    | 29,8   | 1,0                                     | Св1571                       |
|              | –196  | 450              | –                | –                       | –      | 0,92                                    | Св1571                       |
|              | –253  | 480              | –                | –                       | –      | 0,76                                    | Св1571                       |
| 01570        | 20    | 410              | 98               | 34,5                    | 23,2   | 0,93                                    | Св1571                       |
|              | –196  | 480              | –                | –                       | –      | 0,9                                     | Св1571                       |
|              | –253  | 520              | –                | –                       | –      | 0,85                                    | Св1571                       |
| 01570C       | 20    | 400              | 100              | 35,2                    | 24,1   | 0,97                                    | Св1571                       |
|              | –196  | 480              | –                | –                       | –      | 0,94                                    | Св1571                       |
| 01460        | 20    | 300              | 24               | 10                      | 6,1    | 0,53                                    | Св1217                       |
|              | –196  | 355              | –                | 7                       | –      | 0,57                                    | Св1217                       |
|              | –253  | 385              | –                | 6                       | –      | 0,58                                    | Св1217                       |
| 1151         | 20    | 385              | 30               | 6,5                     | 3,3    | 0,82                                    | Св1177                       |

Примечание: Приведены средние данные по результатам испытаний 5-ти образцов.

ратуре испытания  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  сплав 01545К вообще вне конкуренции по совместным показателям основного металла и сварных соединений.

Углы изгиба сварных соединений из сплавов системы Al–Mg–Sc в 1,6–5,5 раза выше, чем для сплавов 1460 и 1151.

Ударная вязкость, как по шву, так и по линии сплавления для всех сплавов системы Al–Mg–Sc в 2–5 раз выше, чем для сплавов 1460 и 1151.

Были проведены исследования влияния способа автоматической сварки (непрерывная, импульсная) и скорости сварки на механические свойства сварных соединений (табл. 16). Изменение способа автоматической сварки оказывает минимальное влияние на свойства сварных соединений из сплавов системы Al–Mg–Sc.

Изменение скорости сварки также не оказало заметного влияния на прочностные свойства сварных соединений из сплавов системы Al–Mg–Sc. В то же время для сплава 1151 отмечается снижение предела прочности на 15–20 %, угла изгиба на 30–40 %, ударной вязкости по шву на 35–45 % и по линии сплавления на 30–45 % при изменении скорости сварки с 30 до 8 м/час.

Таким образом, сплавы системы Al–Mg–Sc имеют еще одно преимущество, а именно – малое влияние способов и режимов сварки на свойства сварных соединений.

Выполнены исследования малоциклового выносливости сварных соединений из сплавов 01570 и 1151 на машинах типа НГП с частотой нагружения 5–8 циклов в 1 мин и коэффициентом асимметрии цикла 0,1.

При высоких уровнях нагружений (200–240 МПа) долговечность сварных соединений из сплава 01570 примерно на  $(1,0\text{--}1,6) \cdot 10^4$  циклов больше, чем для сплавов 1151 и 01460. При относительно низких уровнях нагружений (160–170 МПа) долговечность сварных соединений из сплава 01570 примерно на  $(0,2\text{--}0,6) \cdot 10^4$  циклов больше, чем для сплавов 1151 и 01460.

В ряде случаев при изготовлении гермосило-вых конструкций сложной формы для исправления дефектов (трещины, поры, несплавления), а также в процессе их эксплуатации приходится применять ремонтные подварки. Повторный нагрев и изменение структуры в местах подварок может повлиять на статические и динамические свойства сварных соединений.

С целью имитации дефектов сварных соединений на фрезерном станке выполняли канавки вдоль шва длиной 300 мм на глубину 0,5 толщины деталей. Подварку выполняли ручной аргонодуговой сваркой с присадочной проволокой. После подварки из швов вырезали образцы для испытаний.

Результаты механических испытаний показывают, что подварки значительно влияют на прочностные и особенно пластические свойства сварных соединений. Так например, предел прочности соединений из сплавов 1420, 1460, 1151, 01545 и 01570 после второй подварки снижается соответственно на 16, 17, 16, 4 и 9 %, а после третьей подварки на 20, 24, 22, 8 и 10 % [16, 17].

С увеличением числа подварок угол изгиба также заметно снижается. Так после двухкрат-

Таблица 16

### Механические свойства сварных соединений при различных режимах сварки

| Марка сплава | Способ дуговой сварки | Скорость сварки, м/ч | Режимы импульсной сварки |          | $\sigma_b$ , МПа | KCU, Дж/см <sup>2</sup> |                     | $\alpha$ , град. |
|--------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|----------|------------------|-------------------------|---------------------|------------------|
|              |                       |                      | импульс, с               | пауза, с |                  | по шву                  | по линии сплавления |                  |
| 01570        | Н                     | 10                   | –                        | –        | 410              | 34,6                    | 23,9                | 98               |
|              |                       | 15                   | –                        | –        | 403              | 35,1                    | 24,3                | 98               |
|              |                       | 25                   | –                        | –        | 408              | 36,0                    | 24,6                | 101              |
|              | И                     | 12,5                 | 0,2                      | 0,2      | 418              | 36,4                    | 24,8                | 102              |
|              |                       |                      | 0,3                      | 0,15     | 410              | 36,1                    | 24,5                | 100              |
|              |                       |                      | 0,3                      | 0,2      | 415              | 35,9                    | 24,4                | 98               |
| 1151         | Н                     | 8                    | –                        | –        | 335              | 3,95                    | 2,0                 | 18               |
|              |                       | 15                   | –                        | –        | 351              | 4,7                     | 2,8                 | 21               |
|              |                       | 20                   | –                        | –        | 369              | 5,2                     | 2,9                 | 24               |
|              |                       | 30                   | –                        | –        | 385              | 5,65                    | 3,6                 | 31               |

Примечание: Н – непрерывная сварка; И – импульсная сварка.

ной подварки он уменьшается для сплавов 1420, 1460, 1151, 01545 и 01570 соответственно на 25, 29, 44, 12 и 4 %, а после четырехкратной подварки для сплавов 1151 и 01570 соответственно на 50 и 20 %.

Ударная вязкость сварных соединений по шву и, особенно, по линии сплавления после подварок для сплавов 1420, 1151 и 01460 резко снижается. Так, после 3-ей подварки ударная вязкость по линии сплавления для сплавов 1420, 1151 и 01460 снижается на 50, 46 и 43 %, а для сплава 01570 только на 14 %.

После подварок существенно снижается количество циклов до разрушения по сравнению с образцами, на которых подварки не выполнялись. Так например, для сплавов 1420, 1460 и 01570 число циклов до разрушения на базе  $2 \cdot 10^4$  циклов и 150 МПа после 3-ей подварки снижается соответственно в 2,5, 3,0 и 0,82 раза. Примерно аналогичные результаты отмечаются и при других уровнях нагружения (от 130 до 230 МПа). Анализируя вышесказанное о влиянии подварок на свойства сварных соединений из исследованных сплавов, можно констатировать, что снижение прочностных и пластических свойств для сплавов типа 01545 и 01570 в 2,5–10 раз меньше, чем для сплавов типа 1420, 1460 и 1151.

Такое положение связано только с тем, что сплавы системы Al–Mg–Sc отличаются высокой стабильностью твердого раствора, и в зоне линии сплавления, и в зоне термического влияния процесс коагуляции упрочняющих фаз под действием сварочного нагрева протекает не в таком объеме, как для сплавов 1420, 01460 и 1151.

Следовательно, в конструкциях, изготавливаемых с широким применением ручной сварки (особенно многопроходной) с подварками, применение сплавов системы Al–Mg–Sc, например 01515, 01523, 01545, 01570, в зависимости от расчетных нагрузок, вполне оправдано.

Единственным недостатком сплавов системы Al–Mg–Sc является их более высокая стоимость по сравнению со сплавами типа АМг.

**Сварка трением с перемешиванием сплавов системы Al–Mg–Sc.** Герметичность изделия предъявляет высокие требования к сварным соединениям. Были проведены исследования влияния различных видов сварки на сварной шов [15, 18–31].

Плиты толщиной 30–35 мм из сплава 1570С хорошо свариваются всеми видами сварки.

В качестве основного метода, обеспечивающего практически равнопрочное основному металлу сварное соединение, предпочтительным выглядит сварка трением с перемешиванием (СТП).

Сварка этим методом на сегодняшний день является одной из перспективных технологий и набирает все большую популярность среди мировых производителей авиационной и ракетно-космической техники. Среди основных преимуществ СТП при сварке алюминиевых сплавов по сравнению со сваркой плавлением можно выделить следующие [16]:

- возможность получения беспористых швов;
- отсутствие сварочных материалов;
- не требуется специального профиля кромок и удаления окисной пленки перед сваркой;
- возможность получения соединений во всех пространственных положениях;
- возможность получения швов на сплавах, чувствительных к образованию горячих трещин при сварке плавлением.

Установлено, что на сплаве 1570С возможно получение прочности сварного шва после СТП на уровне не менее 0,9 от прочности основного металла при толщине 35 мм. Исследования микро- и макроструктуры металла шва, выполненного СТП, показали, что во всех зонах соединения отсутствуют дефекты в виде трещин и несплошностей. Сварные соединения имеют высокую ударную вязкость металла шва ( $KCU$  до 70 Дж/см<sup>2</sup>). Метод СТП позволяет восстанавливать не только швы, полученные этим способом сварки, но также может применяться для устранения дефектов сварных швов, полученных дуговой сваркой.

Исследовано влияние микроструктуры сплава 1570С на формирование микроструктуры сварного соединения при СТП. Микроструктура листов представлена сильно вытянутыми в направлении прокатки зернами со средней толщиной порядка 30 мкм. Внутри зерен наблюдается развитая субструктура со средним размером кристаллитов около 0,7 мкм. Плотность дислокаций в материале относительно небольшая (примерно  $4 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$ ), присутствуют равномерно распределенные когерентные частицы  $Al_3(Sc, Zr)$  со средним размером около 9 нм и объемной долей 0,1 %.

Сварка трением с перемешиванием в два прохода позволяет получить бездефектное соединение с хорошо развитой зоной переме-

шивания, в которой формируется полностью рекристаллизованная структура, состоящая из равноосных зерен со средним размером 1,2 нм. Плотность дислокаций по сравнению с основным металлом практически не изменяется – около  $4 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$ . Объемная доля частиц  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$  не изменяется, хотя наблюдается увеличение их размера до 15 нм при сохранении их когерентности.

При растяжении образцов основного металла и сварного соединения наблюдается эффект Портевена-Ле Шателье. Прочностные свойства основного металла и сварного шва очень близки. Вследствие этого при растяжении не наблюдается неоднородного течения материала и локализации деформации в какой-либо зоне сварного соединения. Коэффициент прочности сварного соединения составил 94 %. Разрушение образцов происходило в зоне перемешивания.

Величина удельной тормозящей силы Зинера за счет наличия когерентных частиц  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$  в основном металле и в зоне соединения составляет  $-0,17 \text{ МПа}$  и  $-0,1 \text{ МПа}$ , соответственно. Удельная движущая сила, образованная свободными решеточными дислокациями и границами зерен, составляет  $-0,54 \text{ МПа}$  и  $-1,3 \text{ МПа}$  в основном металле и зоне перемешивания, соответственно. Результирующая движущая сила в основном материале составляет  $-0,37 \text{ МПа}$ , а в зоне перемешивания около  $1,2 \text{ МПа}$ . Таким образом, структура в сварном соединении листов сплава 1570С обладает низкой термической стабильностью. Следует указать, что в зоне перемешивания стабильность структуры существенно ниже, чем в основном металле.

**Алюминиево-литиевые сплавы со скандием.** В промышленные сплавы системы  $\text{Al-Mg-Li}$ , являющиеся одними из приоритетных разработок СССР, скандий вводят с целью повышения прочности деформированных полуфабрикатов за счет сохранения нерекристаллизованной структуры и для улучшения свариваемости.

К настоящему времени достаточно хорошо известны два таких сплава, разработанных под руководством И.Н. Фридляндера в ВИАМе, – 1421 и 1424. Преимущества этих сплавов очевидны: малая плотность ( $2,5 \text{ г/см}^3$ ), высокий модуль упругости ( $E = 77\text{--}80 \text{ ГПа}$ ), достаточно высокая прочность при удовлетворительной пластичности, высокие характеристики трещиностойкости и в особенности циклической долговечности, хорошая коррозионная стойкость и удовлетво-

рительная свариваемость. Это одни из самых перспективных сплавов для использования в авиакосмической промышленности, и альтернативу в этом плане им пока трудно найти.

**Высокопрочные сплавы со скандием.** Введение скандия в сплавы системы  $\text{Al-Zn-Mg-Cu}$  позволило нейтрализовать отрицательное влияние меди на коррозионные свойства полуфабрикатов (особенно в сварных соединениях). Скандий резко измельчает зерно в сварном шве и уменьшает склонность сплавов к образованию горячих трещин. С учетом этого во Всероссийском институте легких сплавов (ВИЛС) разработан сверхпрочный сплав, предназначенный для замены сплава В96Ц в тяжело нагруженных элементах газовых центрифуг для разделения изотопов урана. Принципы легирования этого сплава во многом напоминают подходы, реализованные при создании быстро закристаллизованных сплавов 01959 и 01979. Они обеспечили достижение похожих эффектов на полуфабрикатах относительно небольших сечений, получаемых по традиционным технологиям.

Сотрудниками Всероссийского института авиационных материалов (ВИАМ) предложен сплав, содержащий кроме скандия серебро. Экструдированные полуфабрикаты из этого сплава, по данным патентной заявки, обладают прочностью более  $800 \text{ МПа}$  при относительном удлинении более 10 % [32]. Аналогичное решение запатентовано и в США.

Опыт практического производства и применения показал, что удорожание полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, легированных скандием, по сравнению со стоимостью полуфабрикатов, не содержащих его, составляет 60–80 %. Такое удорожание компенсируется увеличением запаса прочности и существенным снижением веса конструкций летательных аппаратов. В итоге конструкции летательных аппаратов из сплава оказываются дешевле сопоставимых по целевой эффективности. Это доказывает, что несмотря на высокую текущую стоимость сплавов со скандием, их можно рассматривать в качестве весьма перспективных материалов, потенциально эффективных в различных отраслях промышленности.

### Заключение

Выбор сплавов системы  $\text{Al-Mg-Sc}$  дает возможность обеспечения достаточно высокого уровня прочностных свойств без применения трудно реализуемой на практике упрочняющей

термической обработки (заковки и старения) крупногабаритных деталей.

Сплавы системы Al–Mg–Sc обладают высокими показателями свариваемости при сварке плавлением, как с применением присадочной проволоки, так и без нее.

Сварка трением с перемешиванием является перспективной технологией получения герметичных неразъемных соединений из листов и толстостенных плит сплава 1570С, прочность сварного шва может достигать уровня 95–100 % прочности основного металла.

Опыт практического производства и применения показал, что удорожание полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, легированных скандием, по сравнению со стоимостью полуфабрикатов, не содержащих его, составляет 60–80 %. Такое удорожание компенсируется увеличением запаса прочности и существенным снижением веса конструкций летательных аппаратов. В итоге конструкции летательных аппаратов из сплава оказываются дешевле сопоставимых по целевой эффективности.

### Список литературы

1. Филатов Ю.А. Промышленные сплавы на основе системы Al–Mg–Sc // *Технология легких сплавов*. 1996. № 3. С. 30–35.
2. Некоторые структурные особенности алюминий–литиевых сплавов, легированных скандием / И.Н. Фридляндер, Н.И. Колобнев, Л.Б. Хохлатова и др. // Тезисы докл. междунаучно-практ. конф. «Скандий и перспективы его использования», 18–19 октября 1994 г. М.: Гиредмет. 1994. № 3. С. 3.
3. Влияние скандия на структуру слитков сплавов системы Al–Mg / В.И. Елагин, В.В. Захаров, Т.Т. Ростова, Ю.А. Филатов // *Технология легких сплавов*. 1991. № 12. С. 12–28.
4. Алюминиевые сплавы со скандием / Ю.Г. Бушуев, В.Э. Силис, Е.В. Шульгина, Р.И. Доброжинская // Тезисы докл. междунаучно-практ. конф. «Скандий и перспективы его использования», 18–19 октября 1994 г. М.: Гиредмет. 1994. № 8. С. 5.
5. Филатов Ю.А. Деформируемые сплавы на основе системы Al–Mg–Sc и перспективы их применения в автомобилестроении // *Цветные металлы*. 1997. № 2. С. 23–27.
6. Гуреева М.А., Грушко О.Е. Влияние микролегирования кальцием на структуру и свойства алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Si (монография). М.: РУСАЙНС, 2017. 257 с.
7. Андреев В.В., Головкин А.Н., Бондаренко О.В. Экспериментальное исследование прокатываемости алюминиевого сплава системы Al–Mg–Sc // *Технология машиностроения*. 2010. № 42. С. 14–19.
8. Сплав 1570С – материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК «Энергия» / А.В. Бронз, В.И. Ефремов, А.Д. Плотников, А.Г. Чернявский // *Космическая техника и технологии*. 2014. № 4 (7). С. 62–67.
9. Филатов Ю.А., Плотников А.Д. Структура и свойства деформированных полуфабрикатов из алюминиевого сплава 01570С системы Al–Mg–Sc для изделия РКК «Энергия» // *Технология легких сплавов*. 2011. № 2. С. 15–26.
10. О механизме влияния скандия на повышение прочности и термической стабильности сплавов Al–Mg / М.Е. Дриц, С.Г. Павленко, Л.С. Торопова и др. // *ДАН СССР. Металлы*. 1981. Т. 257. № 2. С. 353–356.
11. Структура и свойства сплавов Al–Sc и Al–Mg–Sc / М.Е. Дриц, Л.С. Торопова, Ю.Г. Быков и др. // *Металлургия и металлосодержащие цветные сплавы*. М.: Наука, 1982. С. 213–223.
12. Захаров В.В. О совместном легировании алюминиевых сплавов скандием и цирконием // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. № 6. С. 3–8. DOI: 10.1007/s11041-014-9746-5.
13. Колачев Б.А., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учеб. для вузов; 3-е изд., перераб. и доп. М.: МИСИС, 2001. – 416 с.
14. Корягин Ю.Д., Ильин С.И. Особенности рекристаллизации деформируемых алюминий–магниевого сплавов со скандием // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2017. Т. 17. № 1. С. 65–72.
15. Малофеев С.С., Кулицкий В.А. Структура и механические свойства сварных швов сплава 1570С, полученных сваркой трением с перемешиванием // *Металлы*. 2012. № 5. С. 94–99.
16. Рязанцев В.И., Филатов Ю.А. Технологические аспекты дуговой сварки алюминиевых сплавов со скандием // *Авиационная промышленность*. 2003. № 1. С. 13–17.
17. Рязанцев В.И., Филатов Ю.А., Игнатьев Ю.Е. О выборе присадочной проволоки для дуговой сварки алюминиевых сплавов



- системы Al–Mg и Al–Cu // Авиационная промышленность. 2003. № 2. С. 43–45.
18. Сварка трением с перемешиванием деформируемых и литейных алюминиевых сплавов / В.В. Овчинников, А.А. Антонов, В.В. Алексеев, Л.П. Андреева // Заготовительные производства в машиностроении. 2004. № 10. С. 13–20.
  19. Овчинников В.В., Дриц А.М. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Цветные металлы. 2005. № 2. С. 66–70.
  20. Technical characteristics of friction welding with mixing homogeneous and inhomogeneous thin-sheet joints / P. Vilaca et al. // ZVARANIE–SVAROVANI. 2009. № 11–12. P. 275–281.
  21. Friction welding with mixing lapped plates 2124 aluminum alloy / W.V. Haver et al. // ZVARANIE–SVAROVANI. 2010. № 1–2. P. 3–14.
  22. Gabor R., Roos A., J.dos Santos et al. Friction welding with mixing AA 5083 alloy-n111 // BID ISIM (An XIX. 2010. № 1. P. 49–55.
  23. Manescu A, Calbucci V., Flori F. Et ai. Non-destructive testing of samples obtained by welding a friction with agitation for the aviation industry // BID ISIM 2010. № 3. P. 45–49.
  24. Бахматов П.В., Муравьев В.И., Мелкоступов К.А. Исследование параметров сварки трением с перемешиванием высокопрочного алюминиевого сплава В95Т2. // Сварочное производство. 2010. № 6. С. 17–19.
  25. Hisashi Hori, Tomohiro Komoto. Friction welding with mixing sheet aluminum // Welding Technology. 2010. Vol. 58. No 6. P. 48–53.
  26. Shiniji Koga. Challenges and opportunities of friction welding with mixing. // Welding Technology. 2010. Vol. 58. No 6. P. 70–74.
  27. Tsutomu Ito, Yoshinobu Motohashi, Goroh Iroh. Flexural strength at 18–20° C connections 7075 aluminum alloy friction welding performed with mixing // Journal of the Japan Institute of Light Metals. Vol. 49. No 12. 2011. P. 13–19.
  28. Mroczka K., Pietras A., Kurtyka P. Microstructure and properties of aluminum alloy 6082, obtained by welding a friction with mixing using different welding parameters // ZVARANIE–SVAROVANI. 2012. Roc. 61. No 1–2. P. 7–12.
  29. Предко П.Ю., Фролов В.А., Никитина Е.В. Перспективы применения в авиакосмической области сварки трением с перемешиванием сплавов системы Al–Mg–Sc // Авиационная промышленность. 2012. № 3. С. 47–50.
  30. Малофеев С.С., Кулицкий В.А. Сварка трением с перемешиванием пластин различной толщины сплава системы Al–Mg–Sc // Технология легких сплавов. 2012. № 4. С. 72–76.
  31. Курынцев С.В., Трифонов В.П. Механические свойства сварных соединений из сплава АМг5, полученных двухсторонней сваркой трением с перемешиванием // Сварочное производство. 2014. № 4. С. 25–28.
  32. Патент РФ № 2443793. Российская Федерация, МПК С22С 21/10 (2006.01) С22F 1/04 (2006.01). Высокопрочный сплав на основе алюминия и способ получения изделия из него / Е.Н. Каблов, Е.А. Ткаченко, В.В. Антипов, Р.О. Вахромов; заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ» – 2010141078/02; заявл. 08.10.2010; опубл. 27.02.2012, бюл. № 6.

Материал поступил в редакцию 12.12.2017

# ОВЧИННИКОВ Виктор Васильевич

E-mail: [vikov1956@mail.ru](mailto:vikov1956@mail.ru)  
Тел.: (916) 512-43-82

Академик международной академии информатизации, доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры материаловедения ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет». Сфера научных интересов: металловедение, сварка алюминиевых сплавов, разработка новых свариваемых алюминиевых сплавов, способы сварки конструкций из алюминиевых сплавов. Автор 535 публикаций, в том числе четырех монографий, 122 изобретений.