



УДК 620.194.2:669.71

**ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ НА СКОРОСТЬ  
РОСТА ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ В АЛЮМИНИЕВЫХ  
СПЛАВАХ**

Л.Б. Хохлатова

*кандидат технических наук*

Н.И. Колобнев

*доктор технических наук*

В.В. Антипов

*кандидат технических наук*

С.А. Каримова

*кандидат технических наук*

А.Г. Рудаков

*кандидат технических наук*

М.С. Оглодков

**Март 2013**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Первая публикация статьи - в журнале «Авиационные материалы и технологии», №1, 2011 г.

Данная редакция (дополненная, переработанная) подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ», №3, 2013 г.

*Л.Б. Хохлатова, Н.И. Колобнев, В.В. Антипов, С.А. Каримова, А.Г. Рудаков,  
М.С. Оглодков*

## **ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ НА СКОРОСТЬ РОСТА ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ**

*Скорость роста трещины усталости (СРТУ) – как стандартная характеристика материала – определяется в лабораторных условиях на воздухе, в то время как в реальных условиях усталостная трещина развивается при воздействии внешней коррозионной среды, которая приводит к уменьшению долговечности и снижению запаса циклической прочности материала. В работе исследовано влияние коррозионной среды на СРТУ алюминиевых сплавов, в том числе алюминийлитиевых сплавов.*

**Ключевые слова:** *СРТУ, коэффициент интенсивности напряжений, алюминийлитиевые сплавы, частота нагружения, 3,5%-ный раствор NaCl.*

*L.B. Khokhlatova, N.I. Kolobnev, V.V. Antipov, S.A. Karimova, A.G. Rudakov, M.S. Oglochkov*

## **EFFECT OF CORROSION MEDIUM ON THE FATIGUE CRACK GROWTH RATE IN ALUMINIUM ALLOYS**

*The fatigue crack growth rate (FCGR), as the standard material characteristic, is determined in air under the laboratory conditions, as for the natural conditions the fatigue crack is propagated under the effect of the ambient corrosion medium which leads to decreasing the material endurance and cyclic safety factors. The effect of corrosion medium on FCGR of Al alloys, including Al–Li alloys have been also studied.*

**Key words:** *FCGR, stress intensity coefficient, Al–Li alloys, loading frequency, 3,5% NaCl solution.*

В общем случае коррозионный процесс зависит от вида коррозионной среды, величины и периодичности действующих на металл напряжений. Поэтому правильный выбор коррозионной среды и параметров нагружения при определении СРТУ имеет большое значение для получения корректных результатов. В то же время, задать при испытаниях реальные условия эксплуатации невозможно и, следовательно, необходимо

разрабатывать специальные методики, позволяющие быстро оценить сопротивление металлов в условиях конкретного коррозионного воздействия [1, 2].

Впервые испытания с определением СРТУ в коррозионной среде были предложены фирмой «Аэрбас» ASTM E399-90 для сравнения характеристик сплавов 1424-БТГ1 и 2024-АТ (аналог 1163-АТ), так как сплав 1424 разрабатывался как альтернатива сплава 1163 [3, 4]. Фирмой была предложена методика испытаний, по которой было необходимо использовать солевой раствор (3,5%-ный NaCl+0,2%-ный Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>+0,2%-ный Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) в качестве коррозионной среды, а испытания проводить при частотах в интервале от 8 до 0,03 Гц на машине фирмы MTS. Однако в дальнейшем представители этой фирмы признали испытания при низких частотах, в частности 0,03 Гц, крайне жесткими. Испытания проводили на листах толщиной 4,5 мм из сплавов 1424-БТГ1 и 2024-АТ, на образцах типа ЦНР (пластина с центральным надрезом) шириной 400 мм на воздухе с частотой 8 и 0,03 Гц (рис. 1, а) и шириной 160 мм в коррозионной среде с частотой 8; 2 и 0,03 Гц (рис. 1, б) [5].

При испытаниях на воздухе с понижением частоты нагружения до 0,03 Гц скорость роста трещины усталости на воздухе возрастает как для сплава 1424-БТГ1, так и для сплава 2024-АТ, при этом сохраняется преимущество сплава 1424-БТГ1 (см. рис. 1, а).

Испытания в коррозионной среде продемонстрировало преимущество сплава 2024. При частотах 8 и 2 Гц СРТУ сплава 1424-БТГ1 увеличивается только при низких значениях  $\Delta K$  (15–25 МПа $\sqrt{м}$ ), а при снижении частоты до 0,03 Гц – во всем диапазоне значений коэффициента интенсивности напряжений (см. рис. 1, б).

Как показала практика, проведение испытаний с низкой частотой нагружения на машинах MTS нецелесообразно из-за высокой стоимости испытаний (5–10 сут – на образец). В 2001 г. во ФГУП «ВИАМ» была разработана методика ММ 1.2.004.2001 по оценке СРТУ в коррозионной среде для алюминиевых сплавов (с использованием машины ЦД20) с целью проведения испытаний на СРТУ с низкой частотой (0,1 Гц).

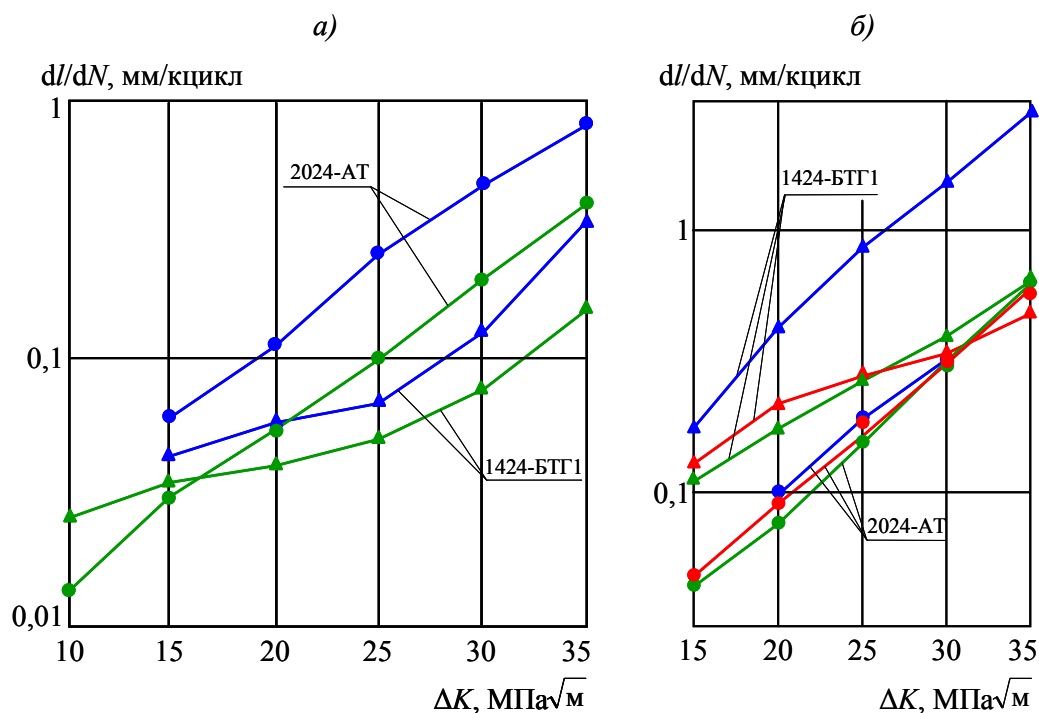


Рис. 1. Зависимость скорости роста трещины усталости при испытании на воздухе (а) и в 3%-ном растворе NaCl (б) сплавов 1424-БТГ1 и 2024-АТ от частоты нагружения  $f$ : 0,03 ( $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ ); 2 ( $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ ) и 8 Гц ( $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ )

Испытания на СРТУ в дальнейшем проводили на листах из коррозионностойких сплавов 1424, 1370, 1913, 2024 в сравнении со сплавом 1441 на образцах размером 100×340 мм с центральным пропилом длиной 6 мм.

Эти сплавы характеризуются различной коррозионной стойкостью при стандартных коррозионных испытаниях (см. таблицу) [6–10].

#### Коррозионная стойкость исследуемых сплавов

| Сплав | Толщина листа, мм | МКК, мм | РСК, балл | КР: $\sigma_{кр}$ , МПа |
|-------|-------------------|---------|-----------|-------------------------|
| 1424  | 4,5               | Нет     | 2         | 300                     |
| 1913  | 1,9               | Нет     | 2–3       | 350                     |
| 1370  | 2,5               | 0,14    | 3         | 250                     |
| 1441  | 1,5               | 0,3     | 3–4       | 150                     |
| 2024  | 4,5               | 0,28    | 5–6       | 300 (25 сут)            |

Результаты испытаний на СРТУ в коррозионной среде с частотой 10 Гц показали, что сплав 1370 не чувствителен к коррозионной среде в отличие от сплава 1424, однако при испытаниях на воздухе преимущество имеет сплав 1424 (рис. 2).

При испытаниях с частотой 2 и 0,1 Гц СРТУ сплавов 1370 и 1913 в коррозионной среде несколько возрастает в основном при малых значениях  $\Delta K$ : 12–18,5 и 12–24 МПа $\sqrt{м}$  соответственно (рис. 3).

СРТУ сплава 1424 в коррозионной среде при частоте нагружения 2 и 10 Гц возрастает в большей степени, что не согласуется с ранее полученными данными (см. рис. 1, б; 2; 3, а). При испытании с частотой нагружения 0,1 Гц наилучшие результаты получены для листа толщиной 1,5 мм из сплава 1441-БТ1.

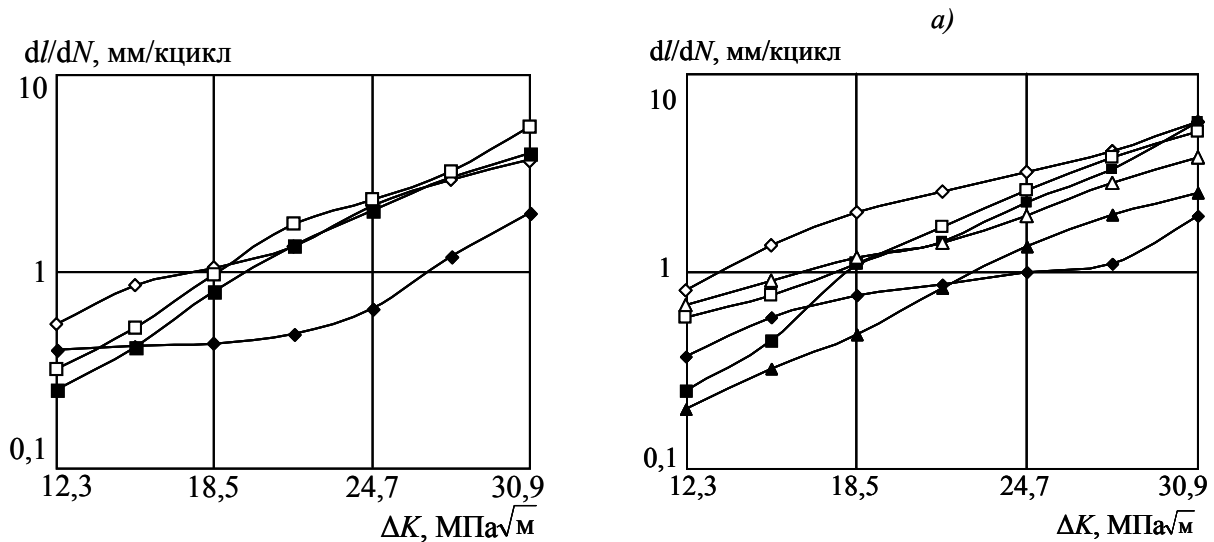


Рис. 2. Зависимость скорости роста трещины усталости сплавов 1424 ( $\blacklozenge, \diamond$ ) и 1370 ( $\blacksquare, \square$ ) от интенсивности напряжений (частота нагружения 10 Гц) на воздухе ( $\blacklozenge, \blacksquare$ ) и в 3%-ном растворе NaCl ( $\diamond, \square$ )

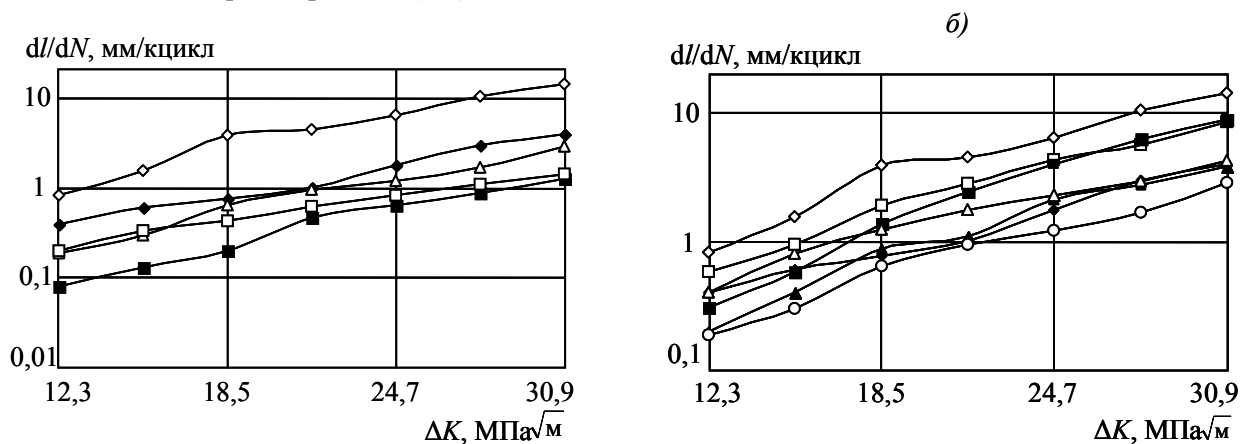


Рис. 4. Зависимость скорости роста трещины усталости сплавов 1424 ( $\blacklozenge, \diamond$ ; толщина листа  $d=4,5$  мм) и 1441 ( $\blacksquare, \square - d=1,5$  мм;  $\triangle - d=3,3$  мм) от интенсивности напряжений (частота нагружения 0,1 Гц) на воздухе ( $\blacklozenge, \blacksquare$ ) и в 3%-ном растворе NaCl ( $\diamond, \square, \triangle$ )

Рис. 3. Зависимость скорости роста трещины усталости сплавов 1424 ( $\blacklozenge, \diamond$ ), 1370 ( $\blacksquare, \square$ ), 1913 ( $\blacktriangle, \triangle$ ;  $f=5$  Гц (а)) и 1441 ( $\circ$ ) от интенсивности напряжений (частота нагружения  $f$ : 2 (а) и 0,1 Гц (б)) на воздухе ( $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle$ ) и в 3%-ном растворе NaCl ( $\diamond, \square, \triangle, \circ$ )

Испытания на воздухе для коррозионностойких сплавов 1424-БТГ1, 1370-Т1 и 1913-БТЗ выявили тенденцию к некоторому росту СРТУ при снижении частоты нагружения, особенно при высоких значениях  $\Delta K$ . В свою очередь, сплавы 1370, 1913 и 1441 мало чувствительны к коррозионной среде как при высоких, так и при низких частотах нагружения в интервале значений коэффициента интенсивности напряжений  $21,4\text{--}30,9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

Испытания в коррозионной среде при частоте 0,1 Гц показали значительное преимущество сплава 1441-БТ1 по сравнению со сплавом 1424-БТГ1 (рис. 4). Что же касается испытаний на воздухе, то в данном случае вывод о разном характере развития трещины усталости затрудняется тем, что сравниваются листы разной толщины с разной зеренной структурой.

Исследуемые листы из сплава 1424 толщиной 4,5 мм имеют волокнистую частично рекристаллизованную структуру. Рекристаллизованное зерно имеет  $70\text{--}150 \text{ мкм}$  – в длину и  $15\text{--}20 \text{ мкм}$  – по толщине в плоскости продольного шлифа. Листы из сплавов 2024 (4,5 мм), 1370 (2,5 мм), 1913 (1,9 мм) и 1441 (1,5–3,3 мм) имеют однородную рекристаллизованную структуру с несколько вытянутыми в направлении прокатки зернами.

При сравнительных испытаниях на воздухе листов толщиной 2 мм с рекристаллизованной структурой СРТУ сплава 1424 значительно выше при низких уровнях интенсивности напряжений и становится заметно ниже при высоких значениях  $\Delta K$ , чем в листах из сплава 1441.

При анализе степени опасности увеличения СРТУ в 3,5%-ном растворе NaCl при частоте нагружения 0,03 Гц, по-видимому, необходимо учитывать результаты всесторонних исследований листов из сплава 1424. Условия этих испытаний могут быть реализованы при наличии трещины и конденсата в элементах фюзеляжа. Критический уровень напряжения для листов из коррозионностойких сплавов 1424, 1370, 1913 составляет  $250\text{--}350 \text{ МПа}$ , что значительно выше, чем у сплавов 2024-Т и 1441-Т1, и поэтому мала вероятность коррозионного растрескивания при эксплуатации. В случае возникновения усталостной трещины у этих сплавов СРТУ не будет превышать  $5 \text{ мм/цикл}$  при  $\Delta K \leq 22 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

Согласно современным представлениям снижение трещиностойкости сплавов при воздействии циклических нагрузок в коррозионной среде (3,5%-ный NaCl) происходит по трем основным причинам:

- локальное анодное растворение металла в вершине трещины (ЛАР);
- водородное охрупчивание (ВО);
- адсорбционное действие поверхностно-активных сред (эффект Ребиндера).

Субкритический рост трещины (рост до критического размера) может происходить отдельно по механизму ЛАР или ВО, или одновременно при доминировании одного из них. ЛАР связано со структурными особенностями материала, его электрохимическими свойствами, составом и рН среды в вершине трещины.

Изучение электрохимических характеристик сплава 1424 и его структурных составляющих в коррозионной среде (3%-ный NaCl+1%-ный HCl) показало, что при стационарном потенциале сплава в активном состоянии находятся фаза  $Al_2MgLi$ , пересыщенный твердый раствор и матричный сплав 1424-ТГ1. Причем скорость растворения этой фазы почти на три порядка больше, чем для указанных составляющих. У сплава 2024 скорости растворения всех структурных составляющих соизмеримы и значительно выше, чем у сплава 1424. Вероятно, в устье трещины в процессе испытания сплава типа 2024 происходит довольно равномерное травление металла, что способствует остановке трещины в результате сглаживания (притупления) ее вершины. Электрохимические процессы, проходящие в устье трещины сплава 1424, наоборот, способствуют локализации распространения трещины в результате значительной разницы в скоростях растворения структурных составляющих.

Для определения содержания водорода в устье трещины усталости после испытаний в коррозионной среде был использован метод локального спектрального анализа. Экспериментально установлено, что содержание водорода в окружности диаметром 1,5–2 мм, прилегающей к вершине трещины, повысилось в 1,5–2 раза по сравнению с содержанием в нейтральной зоне (основной материал).

При адсорбции на поверхности металла молекул (атомов, ионов и т. д.) из коррозионной среды снижается поверхностная энергия металла (поверхностное натяжение), что приводит к снижению прочности и пластичности. При циклическом нагружении адсорбция приводит к уменьшению времени появления трещины на поверхности металла и к увеличению скорости роста трещины усталости при ее магистральном развитии.

При испытаниях на воздухе с понижением частоты нагружения до 0,03 Гц скорость роста трещины усталости возрастает как для сплава 1424-БТГ1, так и для сплава 2024-АТ, при этом сохраняется преимущество сплава 1424-БТГ1. Испытания в коррозионной среде продемонстрировали преимущество сплава 2024-АТ.

Испытания на воздухе для коррозионностойких сплавов 1424-БТГ1, 1370-Т1 и 1913-БТ3 выявили тенденцию к некоторому росту СРТУ при снижении частоты нагружения, особенно при высоких значениях  $\Delta K$ .

Сплавы 1370, 1913 и 1441 мало чувствительны к коррозионной среде как при высоких, так и при низких частотах нагружения в интервале значений коэффициента интенсивности напряжений 21,4–30,9 МПа $\sqrt{м}$ .

При испытании с частотой нагружения 0,1 Гц в коррозионной среде наилучшие результаты получены для листа толщиной 1,5 мм из сплава 1441-БТ1.

При анализе степени опасности увеличения СРТУ в 3,5%-ном растворе NaCl в интервале частот нагружения, по-видимому, необходимо учитывать результаты всесторонних исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Dong Z., Rong C. An Investigation of Alternate Behavior of Corrosion and Fatigue of LY12CZ Aluminum Alloy /In: ICAA9, Institute of Materials Engineering Australasia Ltd. 2004. P. 235–239.
2. Гриневич А.В., Жирнов А.Д., Каримова С.А. Прогнозирование усталостной долговечности металлических материалов при коррозионном воздействии /В сб. докладов VIII науч. конф. «Гидроавиасалон–2010». 2010. Ч. II. С. 199–205.
3. Fridlyander J.N., Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Beresina A.L., Katko A.V., Haszler A. Texture and Grain Structure of Al–Li–Mg–Zr–Sc Alloy Sheets /Proceed. of ICAA-7. 2000. V. 2. P. 867.
4. Фридляндер И.Н., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Рендикс К., Темпус Г. Развитие термически стабильного алюминиеволитиевого сплава 1424 для применения в сварном фюзеляже //МиТОМ. 2002. №1. С. 3–7.
5. Fridlyander J.N., Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Shvechkov E.I., Zhegina I.P., Karimova S.A., Rendigs K.H., Tempus G. Influence of environment and load frequency on fatigue crack propagation of 1424 Al–Mg–Li alloy /Proceedings of the 8th International Conference ICAA8, UK, Cambridge. 2002. P. 1273–1278.
6. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Алюминийлитиевые сплавы /В сб. Авиационные материалы. М.: ВИАМ. 2007. С. 163–171.
7. Колобнев Н.И., Махсидов В.В., Самохвалов С.В., Сбитнева С.В., Попов В.И., Курс М.Г. Влияние деформации после закалки и режимов старения на механические и коррозионные свойства сплава системы Al–Mg–Si–Cu–Zn //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 12–16.
8. Махсидов В.В., Колобнев Н.И., Каримова С.А., Сбитнева С.В. Взаимосвязь структуры и коррозионной стойкости в сплаве 1370 системы Al–Mg–Si–Cu–Zn //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 8–13.
9. Рябов Д.К., Колобнев Н.И., Махсидов В.В., Фомина М.А. О стабильности пересыщенного твердого раствора листов сплава 1913 при закалке //Металлургия машиностроения. 2012. №3. С. 29–32
10. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки /В сб. Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 183–195.

11. Ю.М. Панченко, П.В. Стрекалов, Д.В. Чесноков, А.Д. Жирнов, В.П. Жиликов, С.А. Каримова, Т.И. Тарараева. Зависимость коррозионной стойкости сплава Д16 от засоленности и метеопараметров приморской атмосферы //Авиационные материалы и технологии. 2010. № 3. С. 8-14.