

*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.

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].

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 [2]. 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) [3].

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).

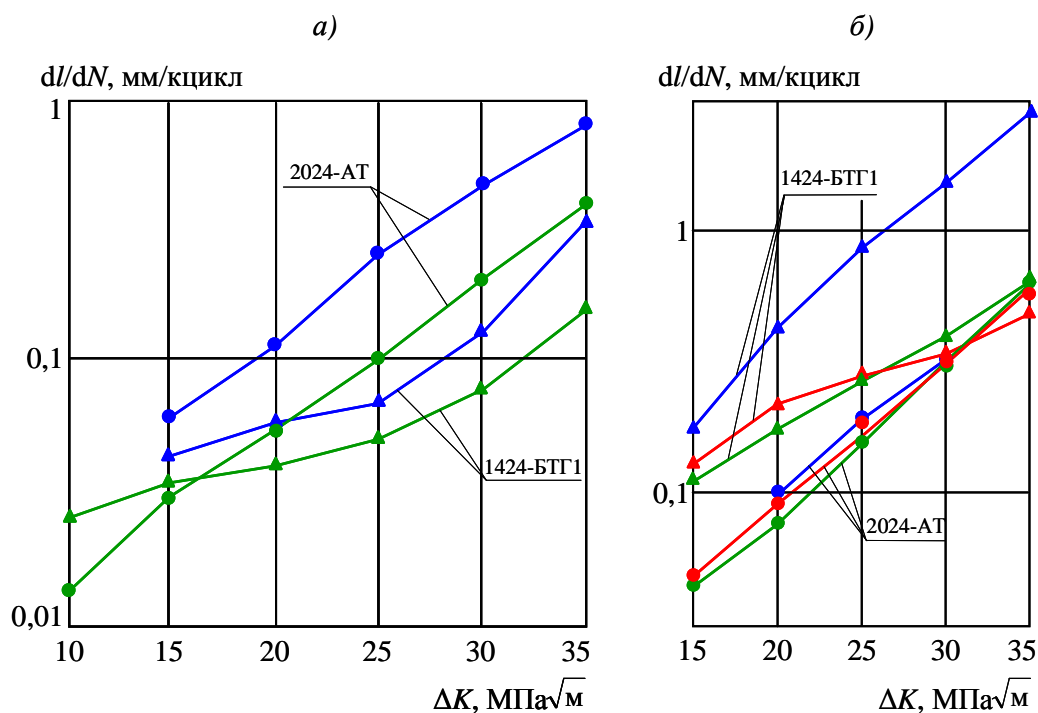


Рис. 1. Зависимость скорости роста трещины усталости при испытании на воздухе (а) и в 3%-ном растворе NaCl (б) сплавов 1424-БТГ1 и 2024-АТ от частоты нагружения  $f$ : 0,03 ( $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ ); 2 ( $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ ) и 8 Гц ( $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ )

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

Эти сплавы характеризуются различной коррозионной стойкостью при стандартных коррозионных испытаниях (см. таблицу).

#### 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  $MPa\sqrt{m}$  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.

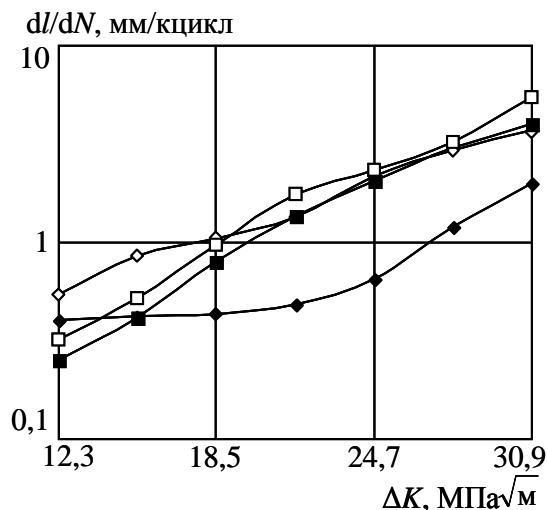


Рис. 2. Зависимость скорости роста трещины усталости сплавов 1424 (◆,◇) и 1370 (■,□) от интенсивности напряжений (частота нагружения 10 Гц) на воздухе (◆,■) и в 3%-ном растворе NaCl (◇,□)

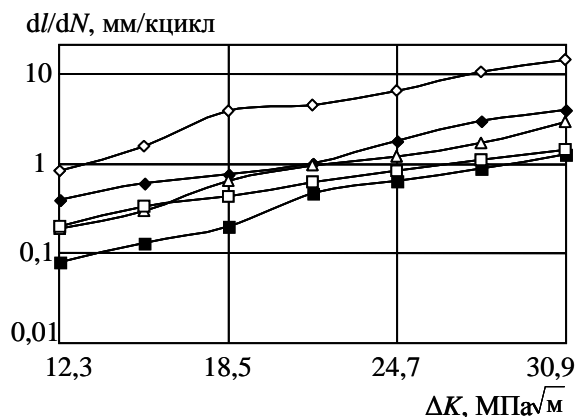
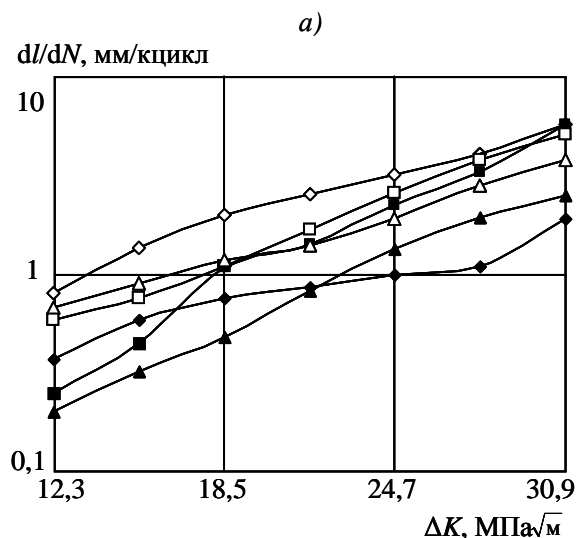


Рис. 4. Зависимость скорости роста трещины усталости сплавов 1424 (◆,◇; толщина листа  $d=4,5$  мм) и 1441 (■, □ –  $d=1,5$  мм; △ –  $d=3,3$  мм) от интенсивности напряжений (частота нагружения 0,1 Гц) на воздухе (◆, ■) и в 3%-ном растворе NaCl (◇, □, △)

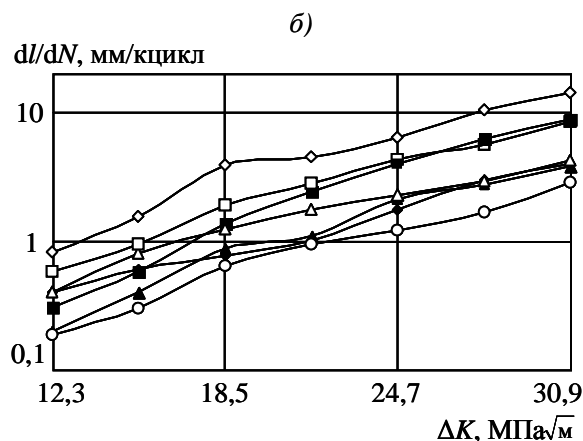


Рис. 3. Зависимость скорости роста трещины усталости сплавов 1424 (◆, ◇), 1370 (■, □), 1913 (▲, △;  $f=5$  Гц (а)) и 1441 (○) от интенсивности напряжений (частота нагружения  $f: 2$  (а) и 0,1 Гц (б)) на воздухе (◆, ■, ▲) и в 3%-ном растворе NaCl (◇, □, △, ○)

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  $\Delta K$ . 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 21,4–30,9 МПа $\sqrt{м}$ .

Испытания в коррозионной среде при частоте 0,1 Гц показали 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 70–150 мкм –

в длину и 15–20 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 250–350 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 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 раздельно по механизму ЛАР или ВО, или одновременно при доминировании одного из них. ЛАР связано со структурными особенностями материала, его электрохимическими свойствами, составом и pH 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  $\text{Al}_2\text{MgLi}$ , 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-БТЗ 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  $21,4\text{--}30,9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

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. Кудряшов В.Г. Вязкость разрушения алюминиевых сплавов. М.: Metallurgy. 1976. С. 65–94.
2. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: Metallurgy. 1983. С. 298–313.
3. Dong Z., Rong C. An Investigation of Alternate Behavior of Corrosion and Fatigue of LY12CZ Aluminum Alloy, ICAA-9. Institute of Materials Engineering Australasia Ltd. 2004. P. 235–239.

УДК 669.018.44:669.245

*В.Н. Толорайя, Е.В. Филонова, Е.Н. Чубарова, Т.И. Комарова, Г.А. Остроухова*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИП НА МИКРОПОРИСТОСТЬ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВКАХ БЕЗУГЛЕРОДИСТЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**

*Исследованы морфология и объемная доля микропор в монокристаллах ренийсодержащих безуглеродистых жаропрочных сплавов ЖС36-ВИ и ВЖМ5-ВИ, а также их изменение в процессе термообработки и ГИП. Проанализировано влияние микропористости на основные прочностные характеристики этих сплавов, длительную и кратковременную прочность и МнЦУ.*

**Ключевые слова:** жаропрочные сплавы, монокристаллическая структура, термовакuumная обработка (ТВО), горячее изостатическое прессование (ГИП).

Монокристаллические заготовки из сплавов ЖС36-ВИ и ВЖМ5-ВИ с кристаллографической ориентацией [001] отливались на установке УВНК-9А по режимам технологии монокристаллического литья с применением затравок из сплавов системы Ni–W или Ni–W–С. Термообработка образцов проводилась в вакуумных печах по режимам ТУ на сплавы ЖС36 и ВЖМ5. Горячее изостатическое прессование (ГИП) заготовок проводилось в газостате «Квинтус-40» фирмы АСЕА (Швеция).

Определение диаметра и объемного содержания микропор проведено на образцах из сплава ВЖМ5 после термической обработки по различным режимам, а также после ГИП, совмещенного со стандартной термовакuumной обработкой (ТВО), на образцах из сплава ЖС36 (литое состояние и после ГИП). Проведены эксперименты по