А. Н. Савкин, Д. С. Денисевич, А. А. Седов, К. А. Бадиков, А. Н. Барышников

**АНАЛИЗ ЗАМЕДЛЕНИЯ СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН
ОТ ПЕРЕГРУЗОК РАЗЛИЧНОЙ ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА
В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ 2024-T3**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: savkin@vstu.ru

Настоящая работа освещает итоги испытаний с перегрузками и недогрузками на алюминиевых образцах в регионе околопороговых скоростей роста трещин. Получены кривые роста трещины и значения долговечности, которые классические модели прогнозирования усталостной долговечности Элбера, Барсома, Уилера и Уилленборга не смогли объяснить. Фрактографический анализ верифицировал корректность кривых усталостного разрушения. Химический анализ содержания кислорода на разрушенных поверхностях образца по методу энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показал возможность наличия взаимосвязи между весовой долей активных частиц и остаточными напряжениями в материале и подтвердил некоторые положения теории хрупкого микроразрушения о влиянии кислорода и водорода на усталостное распространение трещин.

Ключевые слова: усталостное испытание, перегрузка, околопороговая скорость роста, фрактография алюминия, химическая адсорбция, модель усталостной долговечности.

A. N. Savkin, D. S. Denisevich, A. A. Sedov, K. A. Badikov, A. N. Baryshnikov

**ANALYSIS OF REDUCING THE GROWTH RATE OF FATIGUE CRACKS
FROM OVERLOADS OF VARIOUS VALUE AND CHARACTER
IN ALUMINUM ALLOY 2024-T3**

Volgograd State Technical University

This work highlights the results of tests with overloads and underloads on aluminum samples in the region of near-threshold crack growth rates. Crack growth curves and fatigue life values were obtained that the classical fatigue life prediction models of Elber, Barsom, Wheeler and Willenborg could not explain. Fractographic analysis verified the correctness of the fatigue fracture curves. The chemical analysis of the oxygen content on the fractured surfaces of the sample by the method of energy dispersive X-ray spectroscopy showed the possibility of a relationship between the weight fraction of active particles and residual stresses in the material and confirmed some of the provisions of the theory of brittle microfracture on the effect of oxygen and hydrogen on fatigue crack propagation.

Keywords: fatigue test, overload, near-threshold growth rate, aluminum fractography, chemical adsorption, fatigue life model.

Введение

При прогнозировании срока службы изделия перед инженером встает вопрос выбора модели усталостной долговечности. Каждая модель имеет свои недостатки, которые должны быть минимальны для более правильного решения конкретной задачи. Модели пластичности около вершины трещины, например Уилера [1] и Уилленборга [2], разрабатывались для

описания эффекта перегрузки, однако не учитывают закрытие трещины и работают только с большими перегрузками ($K_{ol}/K_{max} \geq 2$) [3]. Модель закрытия трещины была естественным продолжением открытия Элбером этого явления, однако склонна давать очень консервативные результаты [4]. Указанные модели в авторских формулировках работают в режиме Пэри-са и потому соответствуют идее безопасного

срока службы [5]. Бесконечный срок службы подразумевает, что изделие эксплуатируется вплоть до своего физического или морального устаревания и далее, поэтому возрастает интерес к исследованию различных областей скоростей роста трещин da/dN в том числе и порогового размаха коэффициента интенсивности напряжений (КИН) ΔK_{th} [6].

Сегодня большинство исследователей, имеющих дело с механикой разрушения, считают, что ΔK_{th} является постоянной величиной. Однако все больше экспериментальных работ по определению ΔK_{th} и в околопороговом регионе скорости роста трещин дают основание полагать, что это не так [7]. Обычно в таких случаях ΔK_{th} связывают с коэффициентом асимметрии цикла R или максимальным КИН цикла K_{max} .

Материал, образцы, методика исследований

Испытания проводились на высокочастотной сервогидравлической машине BiSS Nano 10 kN на С(Т) образцах толщиной 5 мм из алюминиевого сплава 2024-T3. Направление проката перпендикулярно направлению роста трещины (LT).

План испытаний включал: 1) регулярное нагружение (CAL); 2) испытание с одиночной недогрузкой (UL); 3) испытание с перегрузкой-недогрузкой-перегрузкой (OL-UL-OL); 4) испытание с недогрузкой-перегрузкой-недогрузкой (UL-OL-UL); 5) испытание с одиночной сжимающей недогрузкой (UL_c); 6) испытание с перегрузкой-недогрузкой-перегрузкой, причем недогрузка сжимающая (OL- UL_c -OL); 7) испытание с недогрузкой-перегрузкой-недогрузкой, причем недогрузки сжимающие (UL_c -OL- UL_c). После перегрузок частотой $F=0.1$ Гц происходило базовое регулярное нагружение частотой $F=150$ Гц в течение $N_{bt}=10^4$ циклов, а затем весь блок нагружения повторялся. Основные параметры испытаний одинаковы: $P_{max}=2$ кН, $R=0.75$, $K_{ol}/K_{max}=1.5$, что означает одинаковую монотонную пластическую зону и отсутствие закрытия трещины вследствие высокой асимметрии R . Предварительное растрескивание проводилось с параметрами: $P_{max}=2$ кН, $R=0.1$, $a_0=17$ мм. Недогрузки испытаний были в растягивающей ($K_{ul}/K_{max}=0.15$) или в сжимающей областях ($K_{ul}/K_{max}=-2$), чтобы продемонстрировать влияние текучести поверхностей разрушения вблизи кончика трещины, вызываемой их сдавливанием.

Обсуждение результатов исследования

Наиболее показательные кривые роста $a-N$ и усталостного разрушения $da/dN-\Delta K$ представлены на рис. 1. Результаты долговечностей приведены в таблице. Различия в результатах между испытаниями CAL, UL, и UL_c незначительно (рис. 1, а, б), кривые КДУР почти совпадают, долговечность разнится не более чем в 1.12 раз, причем наименьшее N_f – в CAL, хотя ожидалось – в UL_c .

Различия в результатах между испытаниями со сходной последовательностью перегрузок OL-UL-OL и OL- UL_c -OL более существенно (рис. 1, в, г), хотя кривые $da/dN-\Delta K$ идентичны: долговечность разнится в 1.46 раз, причем наименьшее N_f получено при сжимающей недогрузке. Предполагаем, что сжимающая недогрузка может больше замедлять рост трещины. В этих испытаниях da/dN на порядок ниже, чем в CAL, что демонстрирует эффект перегрузки.

Различия в результатах между испытаниями с противоположной последовательностью перегрузок UL-OL-UL и OL-UL-OL весьма велико (рис. 1, д, е): долговечность OL-UL-OL в 10.3 раза больше, чем в UL-OL-UL. Кривые $a-N$ и $da/dN-\Delta K$ этих испытаний находятся на значительном расстоянии друг от друга. Т.к. на величину остаточных напряжений при базовом нагружении влияет главным образом последний полуцикл перегрузки, то очевидно, что растягивающая перегрузка сильно замедляет рост трещины в околопороговом регионе скоростей роста. Обратим внимание, что $K_{ol}/K_{max}=1.5$ одинаково и для UL-OL-UL, и для OL-UL-OL, потому монотонная пластическая зона одинакова, а значит, модели Уилера и Уилленборга не способны объяснить расхождение. Кроме того, асимметрия высока $R=0.75$, поэтому закрытие трещины отсутствует и модель Элбера неостоятельна. Если предположить, что закрытие трещины все-таки есть, то $K_{op}/K_{max}=0.975$ в испытании OL-UL-OL, но тогда эффективный размах КИН меньше порогового размаха КИН $\Delta K_{eff} < \Delta K_{th}$ и трещина не может расти так, основные модели роста трещины при переменном нагружении оказались не в состоянии объяснить результат; подробный расчет долговечности будет приведен ниже. В испытаниях UL_c -OL-UL₂ и OL- UL_c -OL (рис. 1, ж-и) разница в долговечностях еще больше, наличие сжимающих недогрузок усиливает замедление трещин.

В испытаниях с растягивающими перегрузками диапазон изменения максимальных КИН $K_{max}=16.7...39$ МПа $\sqrt{м}$, а скоростей роста $da/dN=4.46\cdot 10^{-6}...1.8\cdot 10^{-4}$ мм/цикл. Радиус монотонной пластической зоны при плоском напряженном состоянии может определяться по формуле, отбрасывающей часть напряжений:

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_y} \right)^2,$$

где K_{max} – максимальный КИН цикла; σ_y – предел текучести ($\sigma_y=365$ МПа).

Значит, в течение испытаний диапазон изменения радиуса пластической зоны $r_p=0.33...1.81$ мм, а за $N_{bl}=10^4$ циклов диапазон приращений трещины $\Delta a_{bl}=4.46\cdot 10^{-2}...1.26$ мм. Таким образом, монотонная пластическая зона перегрузки и, следовательно, замедление роста, имели место вплоть до разрушения. Однако, по Уилеру [1], остаточные напряжения значительно снижаются по мере прорастания трещины сквозь пластическую зону.

Рис. 1. Кривые роста трещины и диаграммы усталостного разрушения

Фрактографический анализ и адсорбция частиц краями трещины

Для верификации диаграмм усталостного разрушения был проведен фрактографический анализ поверхностей разрушения образцов. Снимки были выполнены с использованием сканирующего электронного микроскопа Versa 3D DualBeam на различных длинах трещин для образцов испытаний UL-OL-UL и OL-UL-OL и приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

Скорость роста трещины определялась на основании измеренных расстояний между маркирующими признаками и числе циклов блока базового нагружения. Исследуемый материал – подходящий для фрактографических исследований алюминиевый сплав 2024-Т3, а недогрузки испытаний создали хорошо различимые полосы, отмечающие продвижение фронта тре-

щины, что обусловило легкость анализа. Воздействия испытаний UL-OL-UL и OL-UL-OL по разному проявляются на фрактографии разрушения. Так для перегрузок OL-UL-OL характерны плотные валики от этих перегрузок, связанные с замедлением фронта продвигающейся трещины. С увеличением длины трещины толщина валиков увеличивается и при длине трещины более 20 мм видны отдельные валики от перегрузок OL и поперечной вмятине от недогрузки UL. Для перегрузок UL-OL-UL до длины трещины 20 мм наблюдается резкий переход от одного блока нагружения до другого в виде поперечной трещины. При длине трещины более 20 мм могут наблюдаться множественные малые поперечные трещины уменьшающие поле сжимающих напряжений и ускоряющие скорость роста усталостной трещины.

В результате фрактографического анализа диаграммы усталостного разрушения оказались схожими с диаграммами, полученными ранее методом податливости.

Теория хрупкого микроразрушения объясняет природу замедления трещины процессами в поверхности вблизи ее кончика, а именно поглощением активных частиц кислорода и водорода, выделяющихся в результате химических

реакций атмосферной влаги и поверхности около кончика трещины с образованием оксидов и гидроксидов [8, 9]. Так, рост растягивающих напряжений на каждом восходящем полуволне вызывает быструю адсорбцию активных частиц и их перемещение в область высоких местных растягивающих напряжений, имеющую размер всего несколько десятков сотен атомных слоев.

Рис. 2. Фрактография поверхностей разрушения испытания UL-OL-UL

Именно поглощенные частицы вызывают дальнейшее разрушение охрупченных поверхностных слоев по I моде. Доминирующую роль в микроразрушении играет поглощенный водород, а влияние кислорода в нормальных усло-

виях незначительно [10], однако присутствие кислорода в разрушенных слоях позволяет судить о присутствии водорода, так как интенсивность поглощения активных частиц обуславливается одним механизмом [8].

Рис. 3. Фрактография поверхностей разрушения испытания OL-UL-OL

Итак, повышенное содержание оксидов на поверхности разрушения после растягивающей перегрузки, соответствие которой устанавливается по маркирующему признаку, вызываемому сжимающей перегрузкой, может подтвердить тот факт, что перегрузки вызывают повышенное поглощение активных частиц слоями материала вблизи фронта трещины.

Для установления этого факта была проведена энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия поверхностей разрушения на базе сканирующего электронного микроскопа Versa 3D DualBeam с целью определения весового содержания кислорода. На рис. 4 приведено распределение весового содержания кислорода на поверх-

ностях разрушения образцов испытаний UL-OL-UL и OL-UL-OL при различной длине трещины, выявленное вдоль сплошной белой прямой на основании 300–400 проб. Анализ распределений содержания кислорода показал, областям, следующим за маркирующим признаком, часто соответствует скачок весового содержания. Чем больше маркирующих признаков попало в анализируемую область, тем больше таких скачков было выявлено. Амплитуда скачков уменьшается по мере разрастания трещины, что может быть объяснено тем, что рост пластической зоны перегрузки ведет к увеличению области проникновения активных частиц на фоне уменьшения их градиента распределения по толщине атомных слоев.

Рис. 4. Весовое содержание кислорода на поверхностях разрушения при различной длине трещины для испытания UL-OL-UL и OL-UL-OL

Статистический анализ позволил построить график зависимости среднего весового содержания кислорода $\omega(O)$ на поверхности разрушения от длины трещины (рис. 5, а). Оказалось, что содержание кислорода в испытании UL-OL-UL незначительно выше, чем в испытании OL-UL-OL. Ожидался противоположный итог, однако теория хрупкого микроразрушения допускает исход активных частиц из объема ма-

териала вследствие сжимающих полуволн, поэтому эмпирический результат не противоречит теории.

Также был построен график зависимости среднеквадратического отклонения весового содержания кислорода $MSD(\omega(O))$ от длины трещины a (рис. 5, б). Было установлено падение $MSD(\omega(O))$ по мере роста трещины в обоих случаях, что может быть объяснено уменьшением градиента распределения активных частиц по толщине материала.

Прогнозирование долговечности по различным моделям

После получения столь различных величин долговечностей при похожих параметрах испытаний была предпринята попытка объяснить их с помощью существующих моделей для нагружения переменной амплитуды. Для этого выбраны модели разных классов: 1) модель закрытия трещины Элбера [4]; 2) статистическая модель Барсома [11]; 3) модель пластичности около вершины Уилера [1]; 4) модель пластичности около вершины Уилленборга [2]. Анализ этих моделей представлен в работе [12].

Рис. 5. Весовое содержание кислорода на поверхностях разрушения для испытаний UL-OL-UL и OL-UL-OL

Большинство параметров заимствованы из источника [16]: $K_{Ic}=32.9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $\Delta K_I=1.22 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $a_s=0.0381 \text{ мм}$, $q=1$, $A_k=1$, $B_k=1.5$, $C_{th}=1.21$, $\beta=2$. Отношение $(S_{max}/\sigma_y)=0.3$ мало влияет на функцию закрытия трещины и считается постоянным [13]. Для получения наибольшей долговечности выбрана минимально допустимая величина $a_g=1.44$ из диапазона 1.15...2.55: меньшие значения подразумевают остановку трещины, в то время как в действительности этого явления не наблюдается.

Результаты расчета даны в таблице. Оче-

видно, эффекты последовательности нагружения и недогрузок не учитывались. Настоящая модель находит применение в анализе материалов аэрокосмической отрасли и авиации, демонстрирует лучшие результаты, но недостаточно, чтобы объяснить результаты экспериментов, представленные в этой работе. Настоящее исследование выявило несостоятельность некоторых моделей анализа усталостной долговечности объяснить результаты достаточно простых испытаний с перегрузками в области роста трещин.

Исследователи предпочитают говорить либо о закрытии, либо об остаточных напряжениях,

демонстрируя недостаточное понимание границы применимости обеих концепций.

Долговечность образцов в испытаниях

Испытание	Долговечность, 10^6 -циклов				
	Результат испытания	Модель Элбера	Модель Барсома	Модель Уилера	Модель Уилленборга
CAL	1	3.46	1.06	1.06	1.06
UL	1.03	1.01...3.41		1.41	1.87
OL-UL-OL	13.4	0.5...2.86			
UL-OL-UL	1.3	0.477...2.85	1.05	1.06	1.06
UL _c	1.12	0.942...3.34	1.06		
OL-UL _c -OL	19.6	0.091...2.45	1.05	1.41	1.87
UL _c -OL-UL _c	1.61	0.039...2.39			

Кроме того, модели Уилера и Уилленборга лежат в основе таких конечно-элементных программ, как Ansys и Abaqus, потому их следует использовать с осторожностью при решении задач механики разрушения. Также результаты показали, что теория хрупкого микроразрушения может оказаться неплохой базой для разработки модели усталостной долговечности в области околопороговых скоростей роста трещин.

Выводы

1. Модели Элбера, Уилера, Уилленборга и Барсома не могут с уверенностью применяться при анализе усталостной долговечности при нагружениях переменной амплитуды металлических конструкций в околопороговой области скоростей роста трещин;

2. Необходима разработка новой модели усталостной долговечности, которая сможет вместить в себя как эффект закрытия трещины, так и влияние остаточных напряжений, а подходящей базой для этого может стать теория хрупкого микроразрушения;

3. Необходимо проводить больше испытаний нерегулярного нагружения, чтобы создать достаточное количество экспериментальных результатов для проверки современных моделей усталостной долговечности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wheeler, O. E. Spectrum loading and crack growth / O.E. Wheeler // Journal of Basic Engineering. – 1972. – Vol. 94. – pp. 181–186.
2. Willenborg, J. A Crack Growth Retardation Model Based on Effective Stress Concepts / J. Willenborg, R.H. Engle, H.A. Wood // Report № AFFDL-TM-71-1 FBR. – Ohio: Wright-Patterson Air Force Base. – 1971. – 22 p.

3. Nelson, D. V. Review of Fatigue Crack Growth Prediction under Irregular Loading / D.V. Nelson // Spring Meeting. Society for Experimental Stress Analysis. – 1975.

4. Elber, W. The significance of fatigue crack closure. Damage tolerance in aircraft structures / W. Elber // ASTM STP 486. – 1971. – pp. 230-242.

5. Shijve, J. Fatigue of Structures and Materials / J. Shijve. – Delft: Springer, 2009. – 623 p.

6. Кудрявцев, П. И. Нераспространяющиеся усталостные трещины / П. И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.

7. Sunder, R. Engineering Application of Threshold Stress Intensity / ASTM-ESIS Annual Symposium on Fracture Mechanics, FL, USA, 13-15 Nov. – 2013. – pp. 24-48.

8. Sunder, R. Fatigue as a process of brittle micro-fracture / R. Sunder // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2005. – Vol. 28. – № 3. – pp. 289-300.

9. Savkin, A.N. Effect of Overload on the Near-Threshold Fatigue Crack Growth Rate in a 2024-T3 Aluminum Alloy: 2.Fatigue Crack Growth Simulation for Calculating the Fatigue Life under Alternating Loading / A.N.Savkin, R.Sunder, A.V.Andronik, A.A. Sedov, Russian (Metally), vol.2019, No. 5, pp.542-547.

10. Bowles, C. Q. The Role of Environment, Frequency and Wave Shape During Fatigue Crack Growth of Aluminum Alloys / C.Q. Bowles // Report № LR-270. – Delft: Delft University of Technology. – 1978.

11. Barsom, J. M. Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading in ASTM 514-B Steel / J.M. Barsom // Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing. ASTM STP 536. – Philadelphia: ASTM. – 1973. – pp. 147-167.

12. Савкин, А. Н. Влияние перегрузок на околопороговую скорость усталостных трещин в алюминиевом сплаве 2024-T3. 1. Влияние характера, величины и последовательности перегрузок на скорость роста усталостных трещин / А. Н. Савкин, Р. Сундер, А. В. Андроник, А. П. Седов // Металлы. – № 6. – 2018. – С. 95–102.

13. Forman, R. G. Behaviour of Surface and Corner Cracks Subjected to Tensile and Bending Loads in Ti-6Al-4V Alloy / R.G. Forman, S.R. Mettu; eds. H.A. Ernst, A. Saxena, D.L. McDowell // Fracture Mechanics. ASTM STP 1131. Philadelphia: ASTM. – 1992. – Vol. 1. – pp. 519-546.