

УНИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ УСТАЛОСТИ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ АМПЛИТУДЕ НАГРУЖЕНИЯ

Р. Сундер

A UNIFIED MODEL OF VARIABLE AMPLITUDE METAL FATIGUE

R. Sunder

BiSS research, 41A, 1A Cross, AECS 2nd Stage, Bangalore 560094, India

Усталость алюминиевых сплавов представляет собой процесс роста трещины с первого цикла нагружения, начиная с усталостным отделением вторичных частиц от матрицы. Этот процесс обладает стадийностью, связанной с механизмом местного микроскопического разрушения, приводящего к удлинению трещины. Идентифицированы пять явно отличающихся между собой механизмов. Некоторые из них очень чувствительны последовательности нагружения.

Данная работа посвящена описанию разных механизмов удлинения трещины, характеристик их действия и определению интервалов степени удлинения трещины.

Циклическое скольжение и пластическая деформация играют незначительную роль в определении долговечности. Наиболее опасную роль в ограничении долговечности играет хрупкое разрушение поверхности кончика трещины в связи с поверхностной химии, которой в свою очередь контролируют местные остаточные напряжения. Последнее также служит основным научным обоснованием эффекта среднего (или остаточного) напряжения в усталости.

В будущих исследовательских работах, наибольшую актуальность представляют количественная оценка доли отдельных механизмов удлинения трещины и аналитическое моделирование самой работы механизмов, а также влияния на них предыстории нагружения. При этом, следует иметь в виду, что по мимо характеристики движущей силы трещины, особое внимание следует обращать на изменяемое сопротивление самого материала.

Введение

Усталость до сих пор осталась эмпирической наукой. Ее приложение продолжает оставаться корреляцией, аппроксимацией, интерполяцией и экстраполяцией. Среди преград на пути продвижения этой науки можно выделить две основных. Первая, это представление усталости как процесса продвигаемого циклическим скольжением, что мешает объяснить решающее влияние среднего напряжения¹, которое ни имеет ни какого отношения к циклическому скольжению. Вторая, это произвольное деление процесса на два этапа – зарождения и роста трещины.

Данная работа посвящена фактографическому описанию тех механизмов, которые играют ключевую роль в процессе усталости. Далее будет показано, как предыстория нагружения может сильно повлиять на них.

Специально построенные испытания на алюминиевых сплавах при программном нагружении блоками из 2000 до 5000 циклов с маркерами показывают, что процесс усталостного роста трещины начинается буквально с первого цикла /2/. Механизм этого процесса очевиден на рис. 1. Он заключается в росте совокупности интерфейсных трещин вокруг вторичных частиц, находящихся в районе концентратора напряжения. Очевидно, что каждую частицу окружают значительные гидростатические остаточные напряжения растяжения. Это обуславливает одновременное отделение по всей

¹ Примерно 20 лет назад, Мансон предположил, что важным достижением науки спустя 25 лет было бы научное обоснование эффекта среднего напряжения [1].

поверхности, хотя прикладываемая нагрузка была одноосной. Этот процесс происходит в естественном вакууме и очевидно, не зависит от среднего напряжения. Далее будет показано, что влияние среднего напряжения тесно связано с наличием среды. Полость, образованная в результате отделения частицы служит начальным размером магистральной трещины.

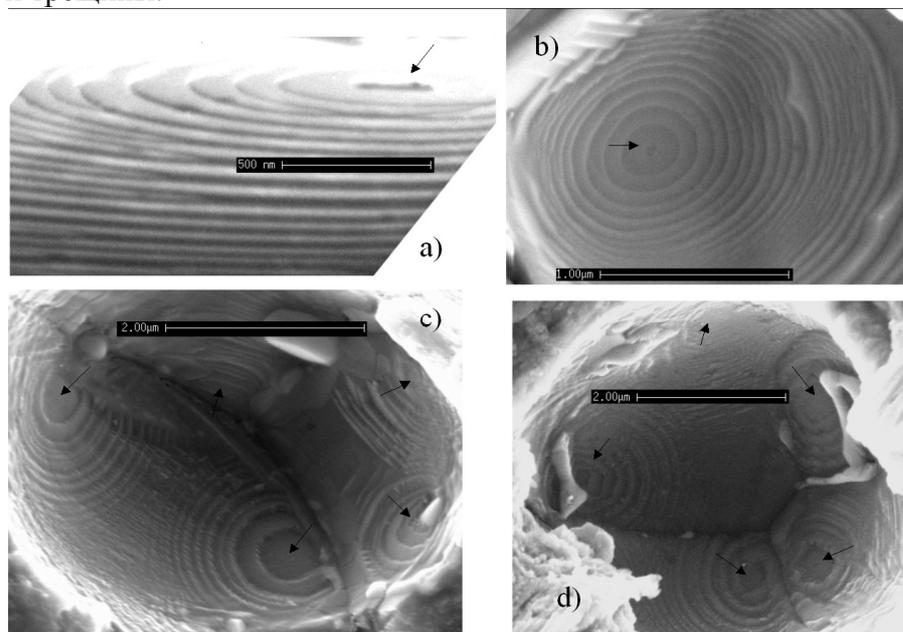


Рис. 1 – Образование усталостных полостей путем отделения вторичных частиц от матрицы в алюминиевом сплаве /2/. Концентрические окружности указывают на движение фронта трещины при программном нагружении с маркерами (а) Прогресс боковой интерфейсной трещины. (б) Интерфейсная трещина на дне полости. (с) and (d) Множество интерфейсных трещин.

В случае, если вторичная частица находится на поверхности концентратора напряжения, среда (воздух) может сильно ускорить отделение частицы и переход на рост от образовавшейся полости, магистральной трещины.

Процесс роста трещины до скорости около 10^{-4} мм/цикл практически определяет долговечность. Следует отметить, что движущая сила, ΔK на этой стадии меньше или равна пороговому значению для условий вакуума, т.е., соответствует полному отсутствию или пренебрегаемой степени циклического скольжения у кончика трещины. Тем не менее, она растет в воздухе. Это можно отнести к механизму поверхностного охрупчивания кончика трещины водородом, выделяемым в последствии адсорбцией влаги и окислением /3, 4/. Процессы поверхностной диффузии и адсорбции очень чувствительны гидростатическим напряжениям у кончика трещины. Их взаимосвязь служит научным обоснованием влияния среднего напряжения на усталость.

Для подтверждения вышеприведенной модели были проведены испытания при программном нагружении на алюминиевых сплавах при комнатной температуре и на никелевых суперсплавах при повышенной температуре. Испытания проводились с периодическими перегрузками для внушения остаточных напряжений сжатия у кончика трещины. При этом, асимметрия цикла была достаточно высокой, чтобы не допустить явления закрытия. Следует отметить, что при высокой температуре, местное охрупчивание происходит за счет окисления. Сравнительные испытания в воздухе и в вакууме показали отсутствие влияния остаточных напряжений на скорость роста трещин и тем самым подтверждают предлагаемую модель /5, 6/.

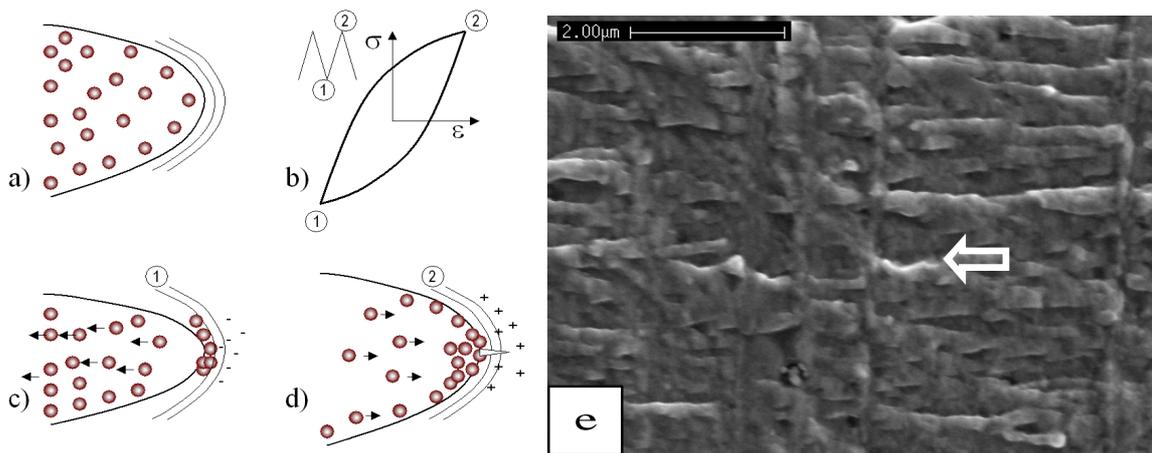


Рис. 2 – Модель роста трещины из за хрупкого микро-разрушения у кончика трещины. (а) Молекулы влаги ровно распределяются у разгруженной трещины (б) Напряжение у кончика трещины колеблется между экстремумами растяжения и сжатия в течение цикла (с) При сжатии, молекулы влаги отталкиваются от кончика, за исключением тех, которые либо вступили в реакцию, либо адсорбированы (д) При увеличении нагрузки, молекулы влаги притягиваются к кончику, увеличивая свою плотность и тем самым, вероятность охупчивания и разрушения поверхностной пленки. (е) Фрактограф излома при пороговых условиях и программном нагружении. Маркеры показывают фронт трещины. Скорость роста около 10^{-7} мм.цикл. При такой нагрузке, трещина бы не расла в вакууме.

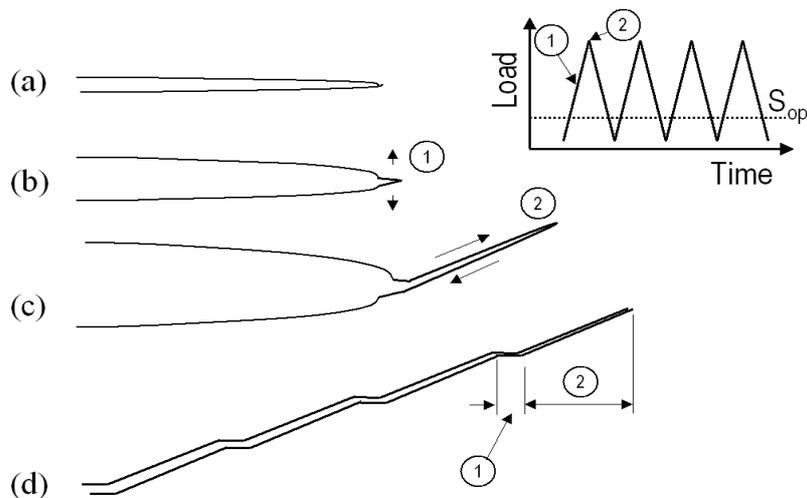


Рис.3 – Модель образования бороздки из за переключения механизма удлинения трещины. (а) Трещина в разгруженном состоянии (б) Удлинение трещины в режиме раскрытия из за разрыва охрупченного поверхностного слоя (с) Исчерпывание ослабленного материала заставляет дальнейшее удлинение в режиме среза. Изменение плоскости разрушение обуславливает формирование видимой бороздки.

Ввиду своей природы описанный выше, процесс поверхностного охрупчивания кончика трещины не может распространяться в глубину материала. Таким образом, при дальнейшем увеличении нагрузки, сопротивление удлинению трещины в режиме раскрытия (разрыва охрупченного материала) увеличивается выше предельной деформации среза. Тем самым, дальнейшее удлинение трещины происходит в режиме среза. Этот процесс схематически изображен на рис. 3.

Судя по схеме показанной на рис. 3, образование усталостной бороздки требует переключение механизма удлинения трещины. Из этого следует, что бороздки не наблюдаются в вакууме. Рис. 4 показывает, что это действительно так. Фрактограф (а)

получен в вакууме, а (b) в воздухе, при чем оба получены при одинаковой скорости роста трещины.

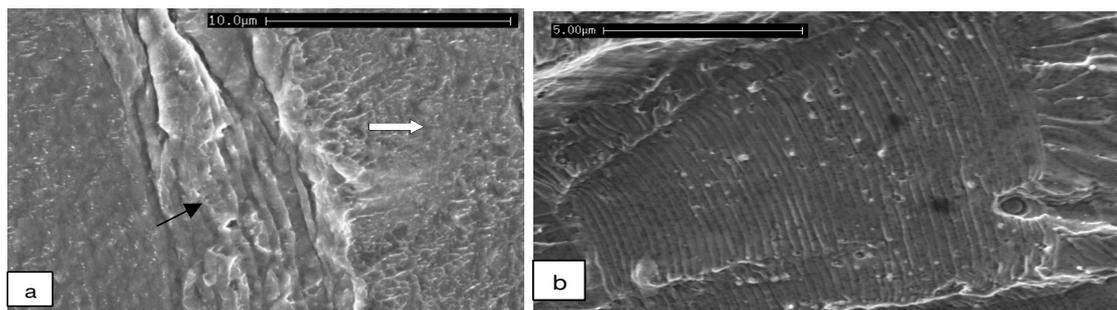


Рис. 4 - Излом полученный (a) в вакууме и (b) в воздухе

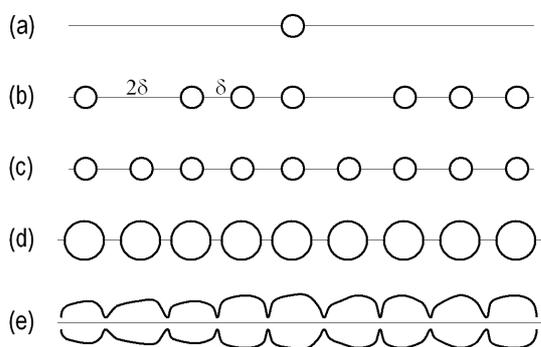


Рис. 5 – Возможная схема хрупкого разрушения впереди кончика трещины из за высоких напряжений растяжения в условиях плоско деформационного состояния. (a) Первая кавитация приводит к ее распространению по плоскости из за быстрого перераспределения нагрузок на окрестность (b, c). (d) Стенки между полостями переходят в плоско напряженное состояние, позволяющее значительную пластическую деформацию в растяжении и разрыву (e)

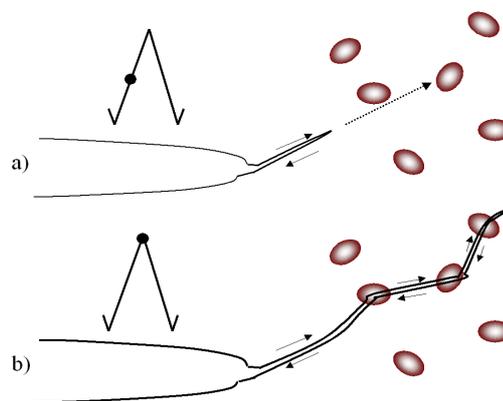


Рис. 6 – Схематическое изображение удлинения трещины из за превышения критической величины среза между соседними вторичными частицами. (a) Трещина сначала удлиняется в режиме раскрытия, затем по плоскости среза (b) Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к срезовому разрушению сечения между вторичными частицами.

Кончик трещины представляет собой чрезвычайно высокий концентратор с соответствующим градиентом напряжения. Это обуславливает плоско деформационное состояние на глубине и тем самым служит преградой скольжению. Таким образом, пока трещина удлиняется от среза впереди накапливаются высокие гидростатические напряжения растяжения. Наступает момент, когда местные напряжения превысят критическое напряжение растяжения, приводя к местной «кавитации» на подобии явления в гидравлике.

Местное статическое разрушение также может происходить из за среза сечения между вторичными частицами /7/.

На самом деле, местное квази статическое разрушение может иметь признаки обоих механизмов, но они различаются по виду как показано на рис. 7. Разрыву от растяжения характерна сеть малых ямок.

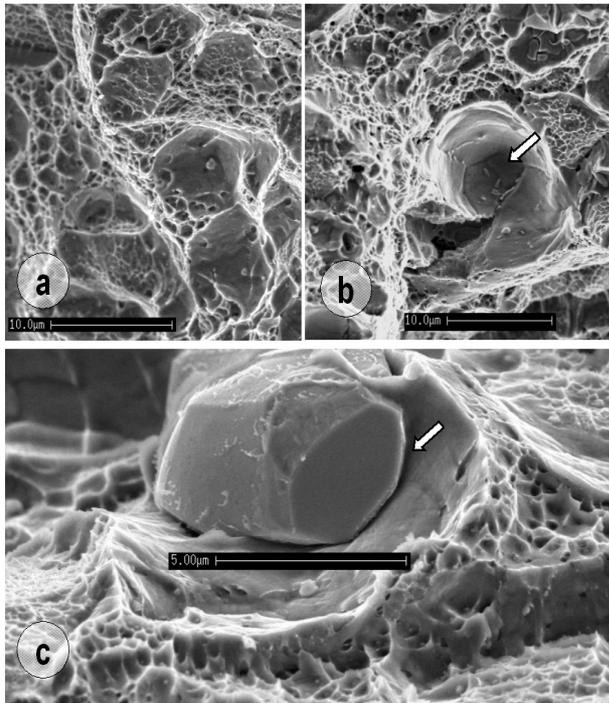


Рис. 7 Квазистатическое разрушение смесью двух механизмов. (с) Не выпавшая вторичная частица.

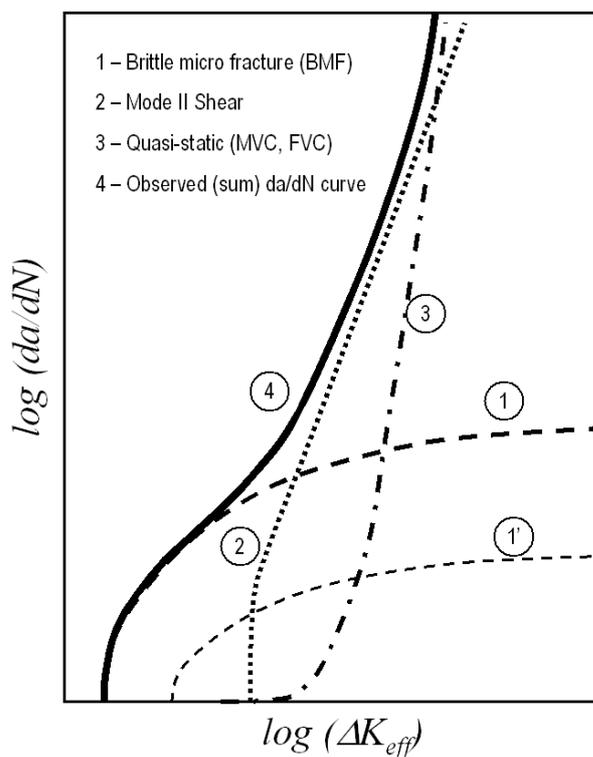


Рис. 8 – Обобщенная схема кинетики усталости

Обобщенная кинетическая схема усталости приведена на рис. 8. Кривая 1 характеризует долю удлинения трещины за счет разрушения охрупченной поверхности кончика трещины. Этот режим отсутствует в чистом вакууме. В воздухе, он может перемещаться вправо при наличии сжимающих напряжений впереди трещины (кривая 1'). Кривая 2 представляет удлинение в широко известном режиме среза. Кривая 3 представляет долю квазистатического разрушения по одному или по другому механизму. Ее положение зависит от асимметрии цикла.

Кривая 4 представляет собой сумму всех трех вышеприведенных составляющих. Ее получают путем испытания лабораторных образцов. Будущая задача заключается в определении указанных составляющих для положения начала аналитического моделирования.

Выводы

1. Процесс усталости алюминиевых сплавов начинается с первого цикла нагружения путем роста множества круглых интерфейсных трещин вокруг вторичных частиц соединения, которых приводит к образованию полости служащей началом магистральной трещины.
2. Выносливость определяется ранними стадиями роста трещины размером меньше, чем то, что принимается в так называемых расчетах на долговечность до появления

трещины определенной величины. Тем самым, сама интерпретация стадии зарождения не имеет перспективы в будущем.

3. Широко принятое истолкование процесса усталости как следствие необратимого циклического скольжения не имеет большой практической важности в определении долговечности. Долговечность в воздухе может исчерпываться при условиях не вызывающих циклического скольжения, достаточного для продвижения трещины в вакууме.
4. Существуют четыре основных механизма удлинения магистральной усталостной трещины. Это микро разрушение охрупченной поверхности кончика трещины, срез и местное квазистатическое разрушение либо от кавитации, либо от среза сечения между вторичными частицами впереди трещины. Стадийность процесса усталости заключается в переключении механизма удлинения трещины с увеличением нагрузки при каждом цикле нагружения.
5. Широко известный эффект среднего напряжения на долговечность можно отнести к совокупности трех механизмов. Это закрытие трещины, особенно у концентратора напряжения, где местная асимметрия цикла может отличаться от прикладываемой, остаточные напряжения, непосредственно влияющие на поверхностную химию поверхности кончика трещины, и прикладываемая асимметрия цикла, влияющая на долю квазистатического локального разрушения. Второй механизм будет отсутствовать в чистом вакууме.

Литература

1. Manson, S.S., Future Directions for Low Cycle Fatigue, Low Cycle Fatigue, ASTM STP 942, H.D. Solomon, G.R. Halford and B.N. Leis, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988, pp. 15-39.
2. Sunder, R., Porter, W.J., and Ashbaugh, N.E., Fatigue Voids and their Significance, *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 25, 2002, pp. 1015-1024.
3. Sunder, R., *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 28, No. 3, pp. 289-300, March 2005.
4. Bowles, C.Q., The Role of Environment, Frequency and Wave Shape Dueing Fatigue Crack Growth of Aluminum Alloys, PhD Thesis, Report LR-270, Delft University of Technology, Delft, 1978.
5. Sunder, R., Porter, W.J., and Ashbaugh, N.E., The Role of Air in Fatigue Load Interaction, *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 26, 2003, pp. 1-16.
6. Ashbaugh, N.E., Porter, W.J., Rosenberger, A.H., and Sunder, R., Environment -Related Load History Effects in Elevated Temperature Fatigue of a Nickel-Base Super-alloy, *Proc., Fatigue 2002*, Stockholm, June 2-7, 2002.
7. Sanders T.H., Jr., and Staley, J.T., Review of Fatigue and Fracture Research on High-Strength Al-Alloys, *Fatigue and Microstructure*, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1978, pp. 467-516.