

О много- и гигацикловой усталости металлов и сплавов

© Э.Б. Завойчинская, А.Р. Каблин

МГУ им. М.В. Ломоносова, механико-математический факультет,
119991 Москва, Россия
e-mail: elen@velesgroup.com

Поступило в Редакцию 19 мая 2023 г.

В окончательной редакции 15 августа 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Систематизированы результаты анализа известных теоретических и экспериментальных исследований развития усталостного разрушения при осевом нагружении и сдвиге. Обсуждено существование единых непрерывных кривых усталости по определенному уровню микро-, мезо- или макродефектности в областях много- и гигациклового нагружения при данной частоте, температуре и асимметрии цикла, и, возможно, различных механизмах развития разрушения. Проведен анализ опытных данных для двух групп металлических материалов с зависящими и не зависящими от частоты нагружения усталостными свойствами.

Ключевые слова: многоцикловая и гигацикловая усталость, микроразрушение, макроразрушение, частота нагружения.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56807.f241-23

Анализ представительного объема опытных данных по много- (в среднем, $N_f \in (10^4, 10^6)$ циклов до макроразрушения) и гигацикловой (в среднем, $N_f \in (10^6, 10^{11})$ циклов) усталости металлических материалов [1–23] выявил наличие разных физических механизмов развития процесса. Металлы и сплавы можно разделить по группам в зависимости от областей по долговечности, где реализуется первый или второй механизмы развития разрушения. По первому механизму в многоциклового области на микроуровне одновременно возможно развитие двух процессов: образование микротрещин на поверхности тела (хрупкое микроразрушение) и зарождение и развитие дислокаций по механизмам скольжения и двойникования с формированием сетчатой субструктуры и плоскостей скольжения (неупругое деформирование и вязкое микроразрушение пластичных материалов) [1,6,11,12], которые реализуются с разной вероятностью. На мезоуровне в результате слияний микродефектов происходит зарождение, развитие и слияние мезодефектов (мезотрещин), в среднем, размера зерна (хрупкое мезоразрушение). Развитие сетчатой субструктуры ведет к движению ансамблей зерен и эволюции пористости с формированием ямочного рельефа с каскадом ступенек. На макроуровне происходят слияния мезотрещин с образованием и развитием макродефектов (макротрещин), ведущие к хрупкому макроразрушению по механизмам транскристаллитного или межзеренного скола, и слияния пор с образованием шейки или излома чашечного строения с усталостными бороздками. В этой области величина неупругих деформаций не превышает величины упругих деформаций, и неупругие деформации сдерживают рост хрупкой трещины. При этом большую часть долговечности, до 90%, занимает развитие микро- и мезоразрушения до образования макротрещины.

В гигацикловой области наблюдается второй механизм развития усталостного разрушения [2–15], который

характеризуется зарождением микротрещин в объеме тела от геометрических концентраторов структуры: в матрице, на границах зерен, от включений и др., с формированием области мелкогранулированной зернистой мезоструктуры „рыбий глаз“ и образованием фасеток микроскола. Н. Mayer, Т. Sakai и др. [9,13] связывают этот механизм со скоплением водорода в микропустотах между включением и матрицей (водородным охрупчиванием), с наличием технологического упрочнения поверхности и дополнительного упрочнения в процессе нагружения, с различными коэффициентами температурного расширения включений и матрицы. Он наблюдается у железа, а также низкоуглеродистых, нержавеющих, подшипниковых, пружинных сталей (рис. 1) и титановых сплавов. Отметим, что в гигацикловой области как при осевом нагружении, так и при кручении возможен первый механизм хрупкого микроразрушения с поверхности тела в случае, когда поверхность опережает внутренние объемы по накоплению микродефектов, например, как у литых Al–Si-сталей (у таких материалов, как правило, не обнаруживается предела выносливости). С. Bathias с сотр [14] в области гигацикловой усталости некоторых сталей, алюминиевых и магниевых сплавов „рыбьих глаз“ не наблюдали. При втором механизме до 99% долговечности занимает образование мезодефектов, скорость их развития в объеме тела существенно ниже скорости развития на поверхности. Н. Mugrabi [15] привел многочисленные доказательства того, что большая часть долговечности — это развитие разрушения до линий Френча при долговечностях, в среднем $N_f > 10^6$ циклов. На рис. 1 представлены данные Т. Beck, S.A. Kovacs, F. Ritz, L. Singheiser [10] для 9–12% углеродистой мартенситно-хромистой стали при различных асимметриях цикла осевого нагружения R. При $N_f > 4 \cdot 10^7$ циклов реализуется механизм хрупкого разрушения, связанный с возникновением оча-

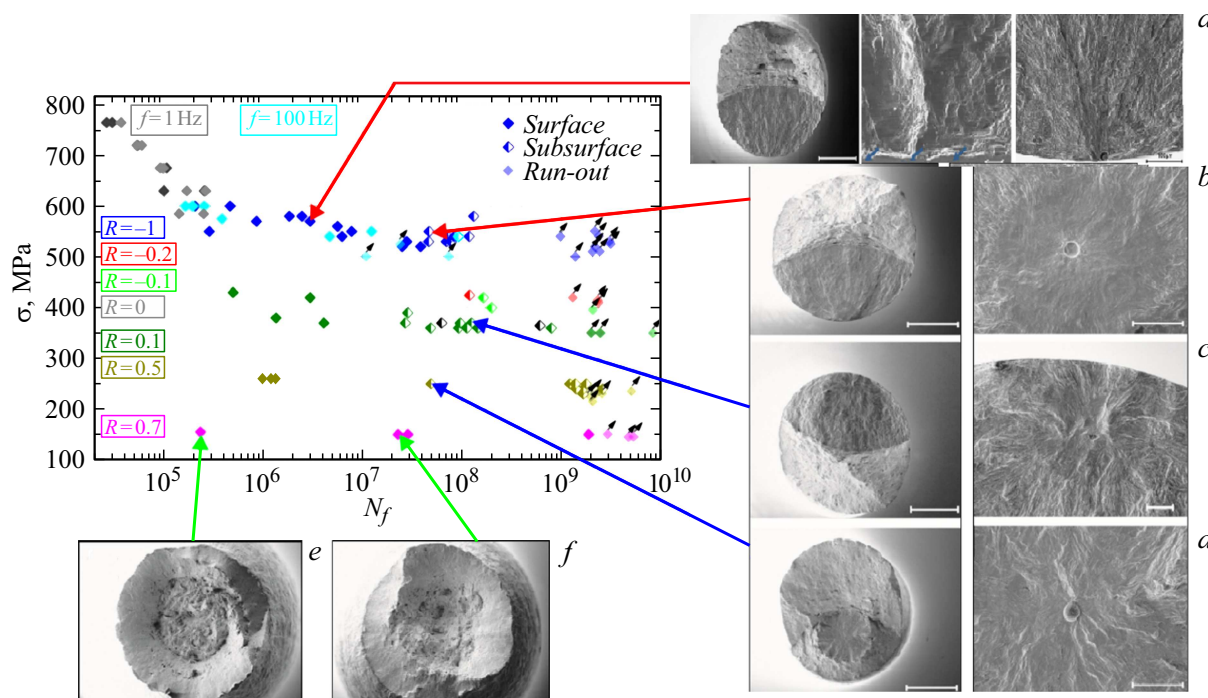


Рис. 1. Опытные данные для стали X10CrNiMoV12-2-2 в координатах: амплитуда напряжения (в МПа) в зависимости от числа циклов до макроразрушения при осевом нагружении и различных асимметриях цикла R с частотой $\nu = 20 \text{ kHz}$, кроме симметричного цикла (где для светлых ромбов $\nu = 100 \text{ Hz}$, для темных ромбов — $\nu = 25 \text{ Hz}$); сплошные ромбы — очаг микроразрушения на поверхности, полусплошные ромбы — в объеме тела, значки со стрелками — неразрушенные образцы. Фрактографии: *a* — $\sigma_a = 570 \text{ MPa}$, $R = -1$, $N_f = 2.97 \cdot 10^6$ циклов; *b* — $\sigma_a = 550 \text{ MPa}$, $R = -1$, $N_f = 4.66 \cdot 10^7$ циклов; *c* — $\sigma_a = 370 \text{ MPa}$, $R = 0.1$, $N_f = 1.24 \cdot 10^8$ циклов; *d* — $\sigma_a = 250 \text{ MPa}$, $R = 0.5$, $N_f = 4.87 \cdot 10^7$ циклов; *b-d* — с очагом от алюминатного включения в объеме тела с областью мелкогранулированной зернистой структуры „рыбий глаз“; *e* — $\sigma_a = 155 \text{ MPa}$, $R = 0.7$, $N_f = 2.35 \cdot 10^5$ циклов; *f* — $\sigma_a = 150 \text{ MPa}$, $R = 0.7$, $N_f = 2.28 \cdot 10^7$ циклов; *e, f* — разрушение в условиях установившейся ползучести.

гов микроразрушения в объеме тела („рыбих глаз“), как представлено на рис. 1, *b-d*. При асимметриях циклов растяжения $R \geq 0.5$ и высокочастотном нагружении обнаруживается, что предельное максимальное напряжение цикла мало меняется с ростом числа циклов и практически равно пределу статической прочности стали. При этом в образцах развивается циклическая ползучесть и неупругое деформирование. Так же известно, что в многоцикловой области некоторых материалов наблюдается образование очага разрушения в объеме тела.

Кривая много- и гигацикловой усталости по микро-, мезо- или макроразрушению [11,12] при одноосном нагружении или сдвиге с асимметрией цикла описывается функцией четырех независимых переменных вида: $\sigma_{\max}^* = \sigma_{\max}^*(\nu, N, T, R)$, где $\sigma_{\max}^*$ — предельное максимальное напряжение, ν — частота нагружения, N — число циклов, T — температура и R — асимметрия цикла.

Проведенный анализ большого объема известных результатов позволяет считать частоту нагружения ν независимой переменной, по которой можно разделить материалы на две группы. Влияние частоты (или скорости нагружения) в общем случае, по-видимому, не является

эффектом разогрева образца (при экспериментальном исследовании особое внимание уделяется (воздушному или водяному) охлаждению образцов, и в условиях охлаждения исследуется зависимость от частоты). Влияние частоты на усталостные свойства различно и зависит от структуры материала [12–16]. К группе материалов, усталостные свойства которых практически не зависят от частоты, относят некоторые никелевые сплавы (Udimet U500, MAR-M-246, ЭИ437Б, У1612 и др.), высокоуглеродистые стали. Материалы, относящиеся к другой группе (рис. 2), например, титановые сплавы (BT22, BT22M, OT4-1, BT22), низко- и среднеуглеродистые стали (45, 1X17H2Ш, 1X2M и X18H9), алюминиевые сплавы (Д16Т) демонстрируют устойчивую зависимость от частоты (по приведенным данным, увеличение пределов усталости, например, для низкоуглеродистых сталей достигает 40%). При этом в зависимости от различной структуры, полученной в технологических процессах штамповки, термообработки и др., один и тот же сплав, как, например, известный титановый сплав BT6 (Ti-6Al-4V) может демонстрировать как отсутствие зависимости от частоты (при различных механизмах зарождения и развития трещин в областях много- и гигацикловой усталости), так и увеличение пределов

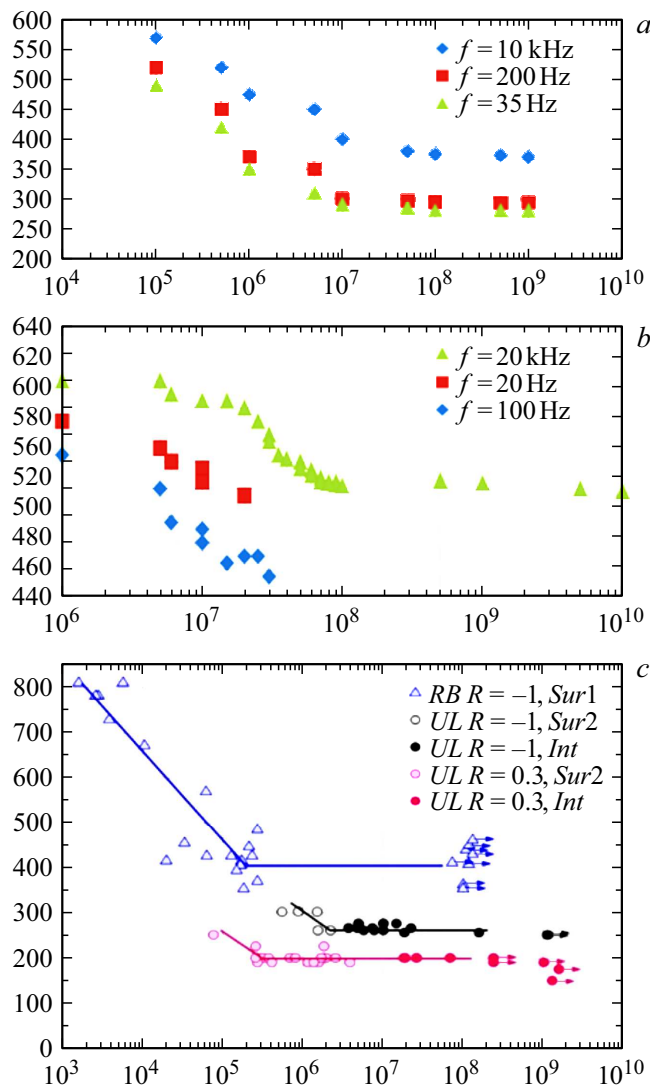


Рис. 2. Опытные данные в координатах: амплитуда напряжения (МПа) в зависимости от числа циклов до макроразрушения для следующих материалов: *a* — никелевый сплав ЭП202 [14], *b* — титановый сплав Ti-6Al-4V [14], *c* — среднеуглеродистая сталь [20] (*RB* — данные при симметричном изгибе с вращением, *UL* — ультразвуковые опыты, *Sur 1* — развитие разрушения по первому механизму не от включения, *Sur 2* — развитие разрушения по первому механизму от MnS включений, *Int* — развитие разрушения по второму механизму [20]).

усталости до 20% с ростом частоты при одинаковых долговечностях (рис. 2, *b*) [16]. По данным некоторых исследователей, возможна немонотонная зависимость кривых усталости от частоты [1,12,16–19]. С уменьшением размера зерна наблюдается увеличение пределов усталости при высокой частоте, при этом имеет место внутризеренное развитие микротрещин, в отличие от низкочастотного, где развитие микротрещин в основном происходит по границам зерен. Оба механизма развития разрушения могут реализовываться с различной вероятностью при любых частоте и асимметрии цикла в зави-

симости от областей по долговечности. Методы высокочастотных испытаний как методы ускоренных испытаний не могут быть применимы для материалов, усталостные свойства которых зависят от частоты; их применение может привести к предсказанию предела усталости при заданной долговечности выше реального. При этом для материалов, усталостные свойства которых не зависят от частоты, есть возможность использования ультразвуковых методов для оценки усталостной прочности.

Кривые усталости являются едиными непрерывными кривыми по каждой из четырех переменных, у них отсутствуют разрывы. Если у материалов определяется условный предел выносливости, то он один. При заданной частоте нагружения отсутствуют: „бифуркационные участки“ кривой усталости, где существуют две ветви кривой по двум разным зависимостям в одном диапазоне по числу циклов, наличие которых полагали и связывали с разными механизмами разрушения А.А. Шанявский и др. [5,6]; „две ветви долговечности“, которые рассматривали Л.Р. Ботвина [1] и В.Ф. Терентьев [21]. Кривая усталости не является „дуплексной кривой“, как ее представляли Т. Sakai [13], К. Shiozawa, S. Ishihara и др. [22]. В много- и гига-цикловой области не существует „эффекта дуальности кривой Велера“, как это полагают О.Б. Наймарк с коллегами [23] и описывают в предложенной ими модели усталостного разрушения. Разные кривые усталости имеют место в зависимости от частоты нагружения для материалов, усталостные свойства которых зависят от частоты. На диаграмме Н. Mugrabi [15] на одном графике представлены две разные кривые усталости при разных частотах для материала с зависящими от частоты усталостными свойствами. Известные циклы экспериментов Т.П. Захаровой, А.А. Шанявского, К. Shiozawa, S. Ishihara, L. Lu и др. [3–6,20,22] для никелевых и титановых сплавов, а также ряда сталей были проведены при изгибе с вращением и, по-видимому, при определении максимальных значений напряжений авторы не учли, что в условиях изгиба в образцах формируется неоднородное напряженное состояние по сечению, и если очаг микроразрушения находится внутри тела, то разрушение при одном и том же числе циклов наступает при меньшем напряжении (которое и нужно брать в качестве $\sigma_{\max}^*$), чем максимальное напряжение, измеренное на поверхности. Поэтому, в частности, не наблюдается двух ветвей кривой усталости в опытах при растяжении-сжатии. Доказывают правомерность предложенных объяснений результаты исследований авторов работы [16], в которой для никелевых сплавов ЖС6У и ЭИ698 и титанового сплава ВТ8М-1 при разных температурах показывается, что осевому растяжению-сжатию и изгибу с вращением соответствуют разные кривые усталости, и кривая при изгибе с вращением лежит выше.

В работах [11,12] процесс хрупкого усталостного разрушения рассматривается как иерархический случайный процесс на шести масштабно-структурных уровнях. Вводятся функции распределения вероятности разрушения

на каждом уровне, для них записывается рекуррентная система определяющих соотношений. Кривые усталости по уровням дефектности определяются по достижению заданных значений вероятности разрушения на каждом уровне. Дается алгоритм нахождения базовых функций по данным стандартных усталостных испытаний при одночастотном осевом нагружении с учетом результатов физических исследований по развитию хрупких трещин.

Таким образом, по результатам анализа можно сделать вывод о существовании единых непрерывных кривых усталости по определенному уровню микро-, мезо- или макродефектности по каждой из переменных процесса в области много- и гигацикловой усталости. В зависимости от диапазона по долговечности для разных материалов разрушение может развиваться как по первому, так и по второму механизму.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Л.Р. Ботвина, А.И. Болотников, И.О. Синев. Физическая мезомеханика, **22** (6), 24 (2019). DOI: 10.24411/1683-805X-2019-16003
- [2] В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова, М.В. Банников, С.Г. Абаимов, И.Ш. Ахатов, Т. Palin-Luc, О.Б. Наймарк. Физическая мезомеханика, **20** (1), 82 (2017).
- [3] А.П. Солдатенков, Е.В. Найденкин, А.А. Шанявский, И.П. Мишин, А.В. Еремин, А.А. Богданов, С.В. Панин. Физическая мезомеханика, **25** (4), 70 (2022). DOI: 10.55652/1683-805X_2022_25_4_70
- [4] Е.В. Найденкин, А.П. Солдатенков, И.П. Мишин, В.А. Оборин, А.А. Шанявский. Физическая мезомеханика, **24** (2), 23 (2021). DOI: 10.24412/1683-805X-2021-2-23-33
- [5] А.А. Шанявский, А.Д. Никитин, Т. Palin-Luc. Физическая мезомеханика, **23** (3), 43 (2020). DOI: 10.24411/1683-805X-2020-13005
- [6] А.А. Шанявский, А.П. Солдатенков. Физическая мезомеханика, **22** (1) 44 (2019). DOI: 10.24411/1683-805X-2019-11005
- [7] A. Sharma, M.Ch. Oh, A. Byungmin. Metals, **10**, 1200 (2020). DOI: 10.3390/met10091200
- [8] T. Palin-Luc, D. Jeddi. Procedia Structural Integrity, **13**, 1545 (2018). DOI: 10.1016/j.prostr.2018.12.316
- [9] U. Karr, Y. Sandaiji, R. Tanegashima, S. Murakami, B. Schönbauer, M. Fitzka, H. Mayer. Intern. J. Fatigue, **134**, 105525 (2020). DOI: 10.3390/met11071075
- [10] H.J. Christ (ed.). *Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles* (Springer, 2018)
- [11] Э.Б. Завойчинская. Заводская лаборатория. Диагностика материалов, **88** (7), 48 (2022). DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-7-48-62
- [12] E.B. Zavoychinskaya. Springer Nature (Switzerland), Structural Integrity, **24**, 211 (2022). DOI: 10.1007/978-3-030-97822-8_24
- [13] T. Sakai, A. Nakagawa, N. Oguma, Y. Nakamura, A. Ueno, S. Kikuchi, A. Sakaida. Intern. J. Fatigue, **93**, 339 (2016). DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.05.029
- [14] C. Bathias, P.C. Paris. *Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice* (Dekker Publisher, NY, 2005)
- [15] H. Mughrabi. Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathem. Phys. Engineer. Sci., **373** (2038), 20140132 (2015). DOI: 10.1098/rsta.2014.0132
- [16] М.А. Горбовец, И.А. Ходинев, В.А. Каранов, В.Д. Юшин, Труды ВИАМ, **3**, 96 (2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104
- [17] В.В. Мыльников. Наука и техника, **18** (5), 427 (2019). DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-5-427-435
- [18] Т. Нгуен Нгок, В.М. Капралов, Г.С. Коленько. Научно-технические ведомости СПбПУ Естественные и инженерные науки, **25** (2), 68 (2019). DOI: 10.18721/JEST.25205
- [19] B.M. Schonbauer, K. Yanase, M. Chehrehrazi, M. Endo, H. Mayer. Mater. Sci. Eng. A, **801**, 140481 (2021).
- [20] L. Liu, Y. Ma, Sh. Liu, Sh. Wang. Materials, **14**, 4318 (2021). DOI: 10.3390/ma14154318
- [21] В.Ф. Терентьев, С.А. Кораблева. *Усталость металлов* (Наука, М., 2015).
- [22] K. Shiozawa, L. Lu, S. Ishihara. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **24**, 781 (2001).
- [23] О.Б. Наймарк, Д.Р. Ледон. Тезисы докладов Междун. конф. Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии, 6–10 сентября 2021 г. (Изд-во ТГУ, Томск, 2021), 564 с. DOI: 10.17223/978-5-907442-03-0-2021-359