

О ВЛИЯНИИ ЧАСТОТЫ ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Мыльников В.В.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижний Новгород, e-mail: mrmynikov@mail.ru

Проведен аналитический обзор влияния фактора частоты циклического нагружения на усталостную прочность и долговечность металлов и сплавов. Степень влияния частоты нагружения на долговечность (N) и циклическую прочность металлов и сплавов в области низких значений частот зависит от большого числа факторов: уровня напряжения, способа нагружения, структуры металла и др. Пределы ограниченной выносливости при низких частотах мало отличаются от пределов ограниченной выносливости при более высоких частотах нагружения. Долговечность при низких частотах более чувствительна к изменению частоты приложения нагрузок, чем предел ограниченной выносливости. В общем случае частота приложения нагрузки неоднозначно влияет сопротивление усталости материалов, поэтому разные материалы в различных областях усталостного разрушения имеют различия в своей реакции на изменение частоты нагружения.

Ключевые слова: частота циклического нагружения, сопротивление усталости, прочность, долговечность, повреждаемость

THE INFLUENCE OF FREQUENCY OF LOADING ON FATIGUE RESISTANCE OF MATERIALS

Mylnikov V.V.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,
e-mail: mrmynikov@mail.ru

An analytical review of the effects of cyclic loading frequency on fatigue strength and durability of metals and alloys. The degree of influence of frequency of loading on the durability (N) and cyclic strength of metals and alloys at low frequencies is dependent on many factors: stress level, method of loading, metal structures and etc. the limited endurance at low frequencies differ little from limited endurance at higher loading frequencies. Durability at low frequencies are more sensitive to frequency change load than the limit of limited endurance. In General, the frequency of application of the load ambiguously affects resistance to fatigue, therefore, different materials in different areas of fatigue fracture have differences in their response to the change of frequency of loading.

Keywords: frequency cyclic loading, fatigue resistance, strength, durability, damaging

Усталость, как явление разрушения конструктивных элементов, имеет место при переменном эксплуатационном нагружении деталей машин и конструкций [1-10]. Процесс усталостного разрушения металлов и сплавов происходит путем постепенного развития и накопления повреждений, вначале субмикроскопических, затем микроскопических с последующим переходом к макроскопическим нарушениям сплошности – образованию усталостных микротрещин. Основной причиной развития и накопления повреждений в процессе усталости является местная пластическая деформация.

Из этого следует, что с уменьшением пластической деформации в процессе циклического нагружения повышается усталостная прочность и, наоборот, уменьшается при увеличении этой деформации.

С увеличением частоты циклического нагружения скорость деформирования увеличивается, а время нарастания напряжения сокращается, при этом увеличиваются и искажения кристаллической решетки, так как

уменьшается время протекания процессов разупрочнения, возрастает интенсивность дробления зерен на фрагменты, блоки и их взаимная разориентировка [11-12].

Работы, опубликованные в периодической печати, касаются более всего области высоких частот, при которых происходит вибрация деталей самолетов и других машин [13-17]. Однако, очень часто, особенно в химическом и металлургическом машиностроении детали и конструкции типа колонной аппаратуры, станин прокатных станов, предохранительных мембран подвергаются нагрузкам с очень низкой частотой. Другая группа оборудования типа теплообменной аппаратуры компрессоров и др. работает в области малоизученных частот от 1,7 до 5 Гц [18-19].

Существует мнение, что изменение частоты не оказывает значительного влияния на сопротивление усталости материалов [1-7, 20-24]. О малом влиянии частоты говорят и результаты исследования алюминиевых сплавов и сталей [25-26], хотя признается некоторая тенденция к увеличению сопро-

тивления усталости материалов при увеличении частоты нагружения.

У сталей в области низких амплитуд напряжений [27] частота циклов в интервале от 3,33 до 83,33 Гц не влияет, однако, при более высоких напряжениях ее влияние становится значительным. Аналогичный эффект получен при испытании алюминиевого сплава в области 57,5 – 176,7 Гц [28].

Установлено, что у алюминиевых сплавов влияние частоты сильнее, чем у сталей. Предел усталости при частоты выше 166,7 Гц возрастает заметно вплоть до 1666,7 Гц (для сталей), но при дальнейшем увеличении частоты резко падает. Аустенитные стали, испытанные тем же способом, при увеличении частоты свыше 1666,7 Гц показывают обратную картину.

Изменение частоты нагружения в интервале 8,33 – 83,33 Гц не вызывает заметного изменения предела усталости, дальнейшее увеличение частоты до 1000 Гц приводит к повышению предела усталости на 5 – 12 % [29].

Частота нагружения в ряде случаев может оказывать заметное влияние на ход кривой усталости. Автором работы [30] показано, что влияние частоты нагружения на циклическую прочность металлов в интервале напряжений выше предела усталости у различных металлов проявляется по-разному. Так, у углеродистых сталей 30 и 45 при испытании на усталость в условиях знакопеременного изгиба с вращением при $1 < \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} < 1,4$ увеличение частоты от 5,7 до 50 Гц приводит к снижению циклической прочности. У хромистых сталей 30Х и 40Х при $\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} < 1,15$ с увеличением частоты нагружения наблюдается повышение циклической прочности, а при $\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} > 1,15$ наоборот ее снижение.

Автор [45] отмечает, что если бы частота не оказывала влияния на сопротивление материалов усталости, то зависимость числа циклов до разрушения от частоты нагружения носила бы прямолинейный характер. Он указывает, что влияние частоты может оказаться незначительным в интервале низких частот, тогда как при частотах выше 10 килоциклов в секунду оно становится весьма заметным.

Область частот от 0,02 Гц и даже его долей до 3,33 Гц изучена мало. Эта область особенно интересна в связи с расчетами циклической прочности машин и аппаратов в ряде производств и, в частности, химических, которые нагружаются с частотой именно этого порядка. Непрерывное снижение циклической прочности [28] при

круговом изгибе и нормальной температуре с уменьшением частоты наблюдается в диапазоне от 500 до 2,5 Гц.

По-видимому, каждый материал при определенной технологии его изготовления, заданной форме образца и определенных условиях его испытания должен иметь частотный минимум циклической прочности.

Долговечность (N) конструкционных сталей и алюминиевых сплавов [29] при переходе к низкой частоте заметно снижается и, чем ниже амплитуда действующего напряжения, тем сильнее влияние частоты. В то же время пределы ограниченной выносливости при низких частотах мало отличаются от пределов ограниченной выносливости при более высоких частотах нагружения. Долговечность при низких частотах более чувствительна к изменению частоты приложения нагрузок, чем предел ограниченной выносливости [29]. Степень влияния частоты нагружения на долговечность (N) и циклическую прочность металлов и сплавов в области низких значений частот зависит от большого числа факторов: уровня напряжения, способа нагружения, структуры металла и др. При низких частотах нагружения наличие геометрических концентраторов напряжения может приводить к увеличению циклической прочности. Так, было показано, что при частоте нагружения меньше 1,7 Гц циклическая прочность надрезанных образцов выше, чем не надрезанных, т.е. при низких частотах циклической нагрузки влияние надреза на усталостную прочность будет обратным тому, которое наблюдается при более высоких частотах.

Установлено [31], что при высоких температурах между временем до разрушения и частотой выполняется зависимость вида:

$$\lg t_B = \lg b - m \lg \omega,$$

где t_B – время до разрушения; ω – частота; b и m – константы.

Если усталостное разрушение происходит после определенного числа циклов при всех частотах, то $m = 1$, а если разрушение происходит после определенного времени при всех частотах, то $m = 0$. Обычно считают, что $m \div 1$.

У свинца при температуре 43 °С при частотах около 0,083 и 0,00007 Гц $m = 0,7$ [31]. В описанной формуле усталостная прочность фигурирует в виде напряжения; поэтому лучше пользоваться формулой С.В. Серенсена [30].

$$\sigma_a \sqrt{t_B} = \frac{V}{\omega^P},$$

где t_B – время до разрушения при амплитуде напряжения σ_a , колеблющегося с частотой

ω ; ν и ∇ – величины, свойственные материалу при данной температуре; p – показатель, характеризующий влияние частоты на время до разрушения при данной температуре. При $p = 1$ $\sigma_a^{\nu}(t_B) = \nabla$ или $\sigma_a^{\nu} N = \nabla$ т.е., получается обычная кривая усталости, выраженная через число циклов N , что характерно для нормальной температуры.

При $p = 0$ $\sigma_a^{\nu}(t_B) = \nabla$, т.е. разрушение определяется временем действия, а не числом циклов нагружения, что характерно для высоких температур, когда разрушение более вероятно по границам зерен, приближаясь по характеру к длительному статическому разрушению.

Из исследования магния [32] при высокой температуре (435 °C) в области частот 10-1700 Гц установлено, что степень упрочнения при циклическом нагружении увеличивается с ростом частоты нагружения и уровня напряжения. Время распространения основной трещины фактически не зависит от частоты, а точнее несколько уменьшается при высокой частоте.

Исследования усталостной прочности сплава нимоник 90 при широко изменяющихся частотах от 0,002 до 133,3 Гц и температуре от 20 до 900 °C показали, что увеличение частоты испытания приводит к увеличению долговечности при более высоких температурах [33]. Повышение температуры испытания увеличивает вероятность интеркристаллитного разрушения, тогда как увеличение частоты уменьшает вероятность этого вида разрушения.

У сплава H46 [34] при частоте 0,002; 0,17 и 133,33 Гц при комнатной температуре при повторном растяжении и при пульсирующем цикле кривые усталости сходятся в точке, соответствующей пределу прочности при растяжении. Очень высокие напряжения повторного растяжения при частоте 0,002 и 0,17 Гц приводили к разрушениям, характерным для ползучести, тогда как при менее высоких напряжениях они соответствовали обычной усталости. Общей тенденцией, проявляющейся при всех испытаниях, было увеличение числа циклов до разрушения с увеличением частоты нагружения.

Как было рассмотрено выше, частота приложения нагрузки существенно влияет на усталостную прочность материала, но это влияние является сложным. На сплаве [35], испытанном на воздухе и в 3-процентном растворе NaCl в диапазоне частот от 3,33 до 100 Гц было обнаружено, что увеличение частоты нагружения гладких образцов сопровождается повышением их коррозионно-усталостной прочности. Для образцов с концентраторами напряжений изменение частоты нагружения в этом же диапазоне

практически не вызывает изменения коррозионно-усталостной прочности. Этот же эффект сохраняется и в интервале частот от 83,33 до 166,7 Гц. У образцов с надрезами, испытанных в воздухе, эффект частоты проявляется весьма существенно, причем величина его зависит от уровня напряжений. В ряде исследований [27, 34-36] установлено, что коррозионная среда снижает эффективность концентрации напряжений, причем тем сильнее, чем больше время воздействия этой среды.

При коррозионно-усталостных испытаниях [37] образцов из алюминиевого сплава в интервале частот от 83,33 до 166,7 Гц не обнаружено влияние частоты, т.е., по видимому, изменение частоты в диапазоне от 33,33 до 166,7 Гц практически не влияет на коррозионно-усталостную прочность образцов, изготовленных из алюминиевых сплавов с концентраторами напряжений. Это объясняется более интенсивным снижением влияния надреза при низкой частоте, вследствие длительного присутствия среды в надрезе; при этом острые края концентратора скругляются за счет воздействия агрессивной среды. При низких амплитудах напряжения и при низкой частоте коррозионно-усталостная прочность гладких образцов и образцов с концентраторами напряжений становится одинаковой [38]. Как уже было показано, этого не наблюдается при высоких частотах, хотя в области низких амплитуд нагружения кривые усталости сближаются.

Автор [39], проводя коррозионно-усталостные испытания при разных частотах, нашел, что для данной частоты между напряжениями и временем существует степенная зависимость, которая может быть представлена выражением:

$$Z_{II}(t \epsilon) = c \sigma^n,$$

где $Z_{II}(t \epsilon)$ – степень повреждения за промежуток времени $(t \epsilon)$, т.е. величина, на которую первая стадия опыта понижает последующий ограниченный предел усталости; σ – циклическое напряжение; c и n – постоянные.

При нормальной температуре частота мало влияет на сопротивление усталости большинства металлов [27], хотя понижение частоты при данном размахе напряжения может несколько уменьшить число циклов до разрушения, так как сопротивление усталости зависит от общего времени действия циклического напряжения, а не только от числа циклов, то влияние частоты усиливается с ростом температуры. Эта закономерность, вероятно, является следствием того, что при низких температурах под воздействием напряжения деформация возникает почти немедленно, в то время как при высоких температурах для этого требуется определенное

время. Кроме того, с повышением температуры роль коррозионного воздействия воздуха растет, а это влечет за собой усиление частоты приложения нагрузки на усталостную прочность материалов. Испытания углеродистой стали на воздухе и в активных средах [40, 43] показали, что при снижении частоты число циклов до разрушения уменьшалось, но время до разрушения увеличивалось и чем больше время испытания, тем сильнее разупрочняет среда материала образца. Разупрочняющее влияние среды проявляется значительно сильнее у закаленных образцов, чем у отожженных. Изучение влияния изменения частоты циклического напряжения от 10 до 1000 Гц на усталостную прочность алюминиевых сплавов показало [45], что при малых базах ($N = 10^6$ циклов) испытаний частота оказывает в 5-10 раз большее влияние на предел выносливости, чем при больших базах ($N = 10^8$ циклов), где влияние частоты не превышает 2-6%.

В качестве заключения можно констатировать, что, в общем, частота сказывается на величине усталостной прочности. Структура материала является определяющим фактором в проявлении влияния изменяемой частоты приложения нагрузки на сопротивление усталости. Поэтому разные материалы в разных областях усталостного разрушения имеют различия в своей реакции на изменение частоты нагружения. Частота повторения нагрузки определяет важные параметры циклического нагружения, влияющие на характеристики сопротивления усталости: скорость нарастания и убывания нагрузки (напряжения), а следовательно, и скорость деформирования и время действия максимальной и минимальной нагрузок цикла.

Список литературы

1. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. – М.: Интернет инжиниринг, 2002. – 288 с.
2. Иванова В.С., Шаняевский А.А. Количественная фактография. Усталостное разрушение. – М.: Металлургия, 1988. – 399 с.
3. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов / Пер. с польск. Г.Н. Мехеда. Под ред. С.Я. Яремы. – М.: Металлургия, 1990. – 432 с.
4. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов / Пер. с англ. Под ред. Б.А. Любова. – М.: Из-во «Мир», 1972. – 408 с.
5. Мак Лин Д. Механические свойства металлов / Пер. с англ. Л.И. Миркина. Под ред. Я.Б. Фридмана. – М.: Металлургия, 1965. – 432 с.
6. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
7. Мак-Ивили А.Дж. Анализ аварийных разрушений / Пер. с англ. Э.М. Лазарева, И.Ю. Шкадиной. Под ред. Л.Р. Ботвиной. – М.: Техносфера, 2010. – 416 с.
8. Пачурин Г.В. Технология комплексного исследования разрушения деформированных металлов и сплавов в разных условиях нагружения: учеб. пособие / Г.В. Пачурин, А.Н. Гуштин, К.Г. Пачурин, Г.В. Пименов // – Н. Новгород, 2005. – 141 с.
9. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
10. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Прогнозирование циклической прочности и долговечности конструкционных материалов. – М.: Изд-во «Спутник +», 2013. – 145 с.
11. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
12. Proceedings of the International Conference VHCF-5, Edited by C. Berger, H.-J. Christ, DVM, June 28-30, 2011, Berlin, Germany, 980 p.
13. R.W.K. Honeycombe. The Plastic Deformation of Metals. London: Edward Arnold Ltd., 1984.
14. Яковлева Т.Ю., Матохнюк Л.Е. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости металлов при различных частотах нагружения // Проблемы прочности. – 2004. – № 4. – С. 145 – 155.
15. Матохнюк Л.Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.
16. Бельский С.Е., Волчок И.П., Митяев А.А. Методика ускоренных испытаний на выносливость // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2011. – № 38. – С. 201-206.
17. Шаняевский А.А. Самоорганизация наноструктур в металлах при сверхмногоцикловой усталости // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. № 5. – С. 91-105.
18. Vitaliy Kazymyrovych. Very high cycle fatigue of engineering materials – A literature review. – Karlstad University Studies, 2009:22.
19. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Variation in factors of fatigue resistance for some pure metals as a function of the frequency of loading cycles // Russ. J. Non-Ferr. Met. – 2010. Vol. 51, No. 3. – p.237–242.
20. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Investigation into the Surface Damage of Pure Metals Allowing for the Cyclic Loading Frequency // Russ. J. Non-Ferr. Met. – 2013. Vol. 54, No. 3. – p.229–233.
21. Heigh B.P.G. Inst. Metals, 1917, p. 18, p. 55.
22. Stanton T.E. and Pannel J.R., Proc. Inst. CE., 1911, p. 188.
23. Suresh S. Fatigue of metals. – Cambridge University Press, 2006. – 701 p.
24. Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
25. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел / Пер. с англ. К.С. Чернявского. Под ред. В.С. Ивановой. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.
26. Smith F.C., Brucggeman and Harwell P. H. NASA. Tech. No 2231, 1949.
27. Weiss T., ASTM Bulletin, 1949, Feb. p.188. p.31.
28. Polakowski W.H., Palschoud A. huri Proc. A. S. T. M. 1954.
29. Oberg T., Gohnson J., Proc. ASTM, 37. 1937. p.11. p.195.
30. Иванова В.С. Усталостное разрушение материалов. М.: Металлургиздат, 1963. – 258 с.
31. Серенсен С.В. Вестник машиностроения. – 1964. – № 6. – С. 35.
32. Ален Н.П., Форрест П.Дж. Усталость металлов. – Изд-во иностр. литературы (перевод с англ.), 1961. – с.49.
33. Skelton R.P., Р.Ж. Механика, 1968, 7В1062.
34. Tilly G.P., Р.Ж. Механика, 1966, 2В754, 2В755, 2В756.
35. Карлашов А.В., Токарев В.П. Заводская лаборатория, 1967. – № 7.
36. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде. – М.: Машгиз, 1963.
37. Карлашов А.В., Томпиков Ю.В. ФХММ. – 1965. – Т. 1, № 2. – С. 188.
38. Gohn G.R. and Ellis W. C. Fatigue of Lead Cable Sheath, Proc. Amer. Soc. Test. Mat., 51, 1951, p.721.
39. Гликман Л.А. Супрун Л.А. Труды ЦНИИ морского флота. – 1956. – № 5.
40. Карлашов А.В., Токарев В.П. ФХММ. – 1967. – Т. 3, № 1.
41. Eckel J.F., Proc. Amer. Soc. Test. Mat. – 1951. – p. 745.
42. Никошин Е.С., Карпенко Г.В. ФХММ. – 1965. – № 5.
43. Карлашов А.В., Токарев В.П. ФХММ. – 51, 1965, – № 5.
44. Карлашов А.В. Вопросы машиноведения и прочности в машиностроении. – АН УССР, 1964. – 253 с.
45. Harris W.J. Р.Ж. Механика. – 1960. – № 9. – 12463.
46. Кеннеди Ф.Дж. Ползучесть и усталость в металлах. – Изд-во «Металлургия», 1965. – 331 с.