

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ПРИЗМАТИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА НА ИЗГИБ

¹Пустовойт В.Н., ¹Гришин С.А., ¹Дука В.В.

¹Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена изучению процессов усталостного разрушения железоуглеродистых сплавов. Целью работы являлась разработка методики расчета и построения диаграмм усталостного разрушения сплавов на основе железа. Разработан метод, позволяющий рассчитывать напряжения возникающее в устье растущей трещины при усталостном разрушении образца закрепленного консольно и подвергаемого циклическому изгибу.

Ключевые слова. Методика расчета, метод разности потенциалов, циклический изгиб, кинетика усталостного разрушения, развитие и рост усталостной трещины, коэффициент интенсивности напряжений K_1 , диаграммы усталостного разрушения.

FEATURES OF THE METHODOLOGY FOR CALCULATING AND CONSTRUCTING A FATIGUE FAILURE DIAGRAM DURING CYCLIC BENDING TESTS OF A PRISMATIC SAMPLE

¹Pustovoi V.N., ¹Grishin S.A., ¹Duka V.V.

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Annotation. The article is devoted to the study of fatigue failure processes of iron-carbon alloys. The aim of the work was to develop a methodology for calculating and constructing diagrams of fatigue failure of iron-based alloys. A method has been developed to calculate the stresses arising at the mouth of a growing crack during fatigue failure of a sample fixed cantilevered and subjected to cyclic bending.

Keywords. Calculation method, potential difference method, cyclic bending, fatigue fracture kinetics, fatigue crack development and growth, stress intensity coefficient K_1 , fatigue fracture diagrams.

Введение. Хорошо известно, что наиболее существенной характеристикой любой стали, является сопротивление процессу разрушения. Уже много лет ученые всего мира занимаются проблемами механики разрушения [1-4]. Поэтому изучение этих процессов и на современном этапе не потеряло свою актуальность. Одним из факторов процесса разрушения является зарождение и развитие усталостной трещины, изучению которых посвящены многочисленные работы в России и за рубежом [5-7]. В связи с этим возникает большой интерес изучения процессов разрушения в сталях имеющих своеобразную структуру, получаемую с помощью специальных режимов механической и термической обработки.

В настоящей работе изучается процесс разрушения в стали 18Х2Н4ВА после нормализации. Для этого проводили усталостные испытания призматических образцов на циклический изгиб [8] с целью расчета и построения графиков кинетики развития усталостной трещины, определения скорости роста трещины в зависимости от количества циклов колебаний и на основании этих данных построения диаграмм усталостного разрушения [9,10].

Диаграммы усталостного разрушения дают наиболее информативные данные о процессе роста трещины, поскольку график состоит из трех этапов, различающихся разным механизмом роста трещины [11,12]. Первый этап характеризуется зарождением и малым ростом трещины. На втором этапе трещина практически растет с постоянной скоростью. И на третьем этапе, когда трещина достигает критической величины, происходит резкое увеличение скорости ее роста, что в конечном итоге приводит к практически хрупкому разрушению образца.

Известно, что при усталостных испытаниях на знакопеременный изгиб используются различные циклы нагружения образца. Соответственно различают в основном три цикла нагружения образца [13, с.535]:

- симметричный цикл нагружения, когда максимальные напряжения (σ) растяжения и сжатия равны (рис.1а);
- асимметричный цикл нагружения, когда максимальные и минимальные напряжения (σ) не равны по величине (рис.1б);

- отнулевой цикл нагружения, когда напряжения (σ) изменяются от нуля до максимума (рис.1в).

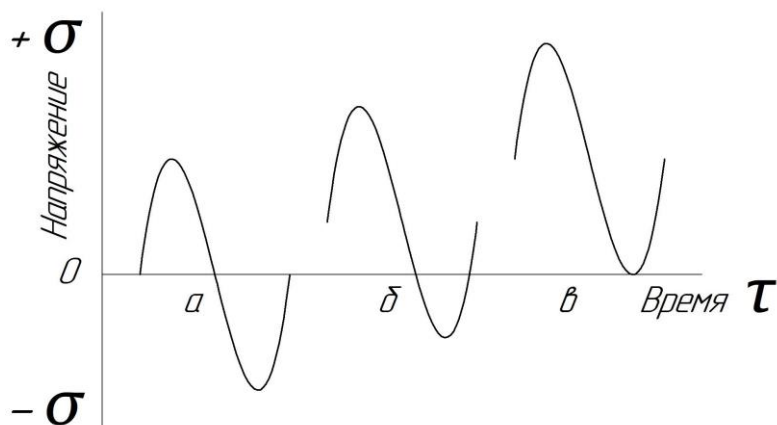


Рисунок 1 - Разновидности циклов напряжения при усталостных испытания на знакопеременный изгиб.

Чаще всего подобные испытания проводят на круглых образцах методом кручения с изгибом [14]. В таком случае в месте возникновения и роста трещины возникают как растягивающие, так и сжимающие напряжения т.е. реализуется симметричный цикл нагружения. Однако при таких испытаниях, возникающие напряжения сжатия обязательно приводят к наклепу берегов растущей трещины и естественно негативно сказываются на результате эксперимента.

В нашем случае проводили усталостные испытания призматических образцов на циклический изгиб по отнулевому циклу нагружения. Т.е. применялся изгиб, при котором изгибающий момент приводил только к растягивающим напряжениям возникающим в образце, сжимающие напряжения в данном случае были равны нулю. Это достигалось при настройке вибростенда, когда растягивающее образец усилие было направлено только в одну сторону (рис.2.). Это наиболее правильное решение, поскольку в этом случае исключается возможность наклепа берегов трещины при ее росте.

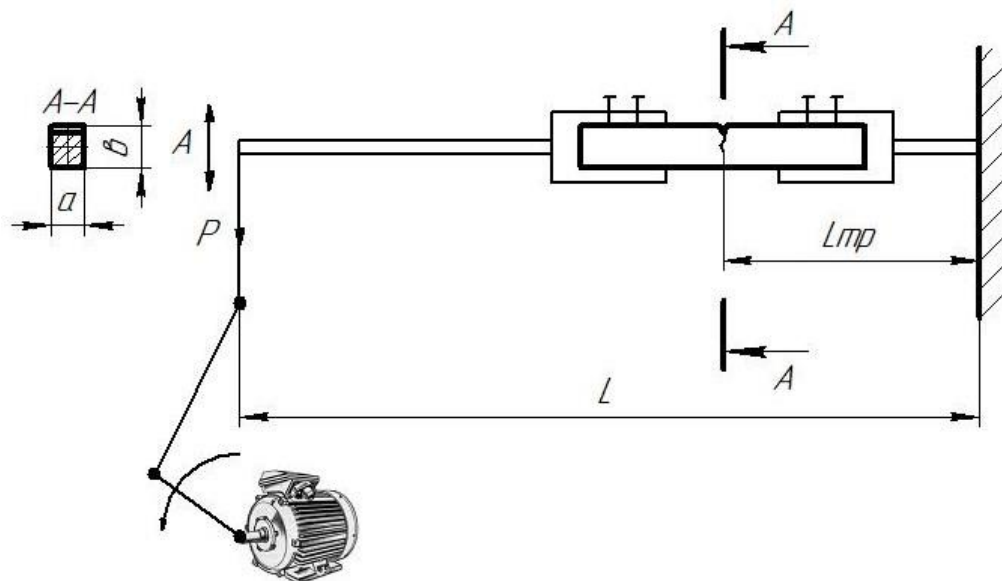


Рисунок 2 - Схема нагружения призматического образца при циклическом испытании на изгиб.

В процессе проведения серии экспериментов параметры вибрационного стенда и образцов имели постоянные параметры, т.е. $L=540$ мм., $L_{mp}=160$ мм. Величина размеров a и b могла быть разной в зависимости от используемых образцов. Амплитуда колебаний также могла задаваться в зависимости от технологии термообработки и твердости образцов. При этом величина напряжения, возникающего в устье растущей трещины была неизвестна, поскольку зависела от амплитуды колебаний A .

Для определения всех необходимых данных, необходимых для построения диаграмм усталостного разрушения, проводили расчеты по формулам известным из [13, с.297,729]. Согласно которым величина амплитуды A определяется по формуле

$$A = \frac{PL^3}{3EJ} \quad (1)$$

Зная величину амплитуды можно определить величину P

$$P = \frac{3EJA}{L^3} \quad (2)$$

где E модуль упругости (для стали $E = 200\text{ГПа}$);

J момент инерции, который определяется по формуле для призматического сечения образца

$$J = \frac{av^3}{12}, \quad (3)$$

при этом в процессе усталостных испытаний величина b (см.рис.2.) с учетом надреза и роста трещины будет постепенно уменьшаться, соответственно будет меняться и момент инерции. В данном случае размеры используемых образцов и амплитуда колебаний были следующими:

$a = 12,5$ мм., $b = 6,8$ мм., $A = 5$ мм. В качестве инициатора зарождения изготавливали V-образный надрез глубиной 1 мм. Таким образом, начальная величина b с учетом надреза была равна 11,5 мм.

Поскольку при исследовании различных процессов термического упрочнения образцы могли иметь разные размеры была разработана компьютерная программ для расчета всех необходимых экспериментальных данных.

На основании произведенных расчетов для указанного выше образца было установлено следующие: усилие, действующее на образец в процессе циклического изгиба

$$P = 16,4H \quad (4)$$

В этом случае изгибающий момент в месте крепления образца равен

$$M = PL = 8,86Hm, \quad (5)$$

а в месте развития трещины

$$M = 6,24Hm. \quad (6)$$

Таким образом, напряжение в месте развития трещины было равно

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (7)$$

где M - изгибающий момент, W - момент сопротивления для прямоугольного сечения

$$W = \frac{av^2}{6} \quad (8)$$

При этом в процессе развития трещины напряжение σ будет возрастать из-за изменения величины W в связи с уменьшением величины высоты образца b .

В данном случае исследования проводились на призматических образцах из стали 18Х2Н4ВА после нормализации. В процессе проведения испытаний на усталостных изгиб записывалась диаграмма кинетики роста трещины фиксируемая с помощью метода разности потенциалов [8,15,16] в координатах "разность потенциалов - время". Эта диаграмма затем расшифровывалась для построения графика "зависимости длины усталостной трещины от числа циклов усталостных испытаний", который приведен на рисунке 3.

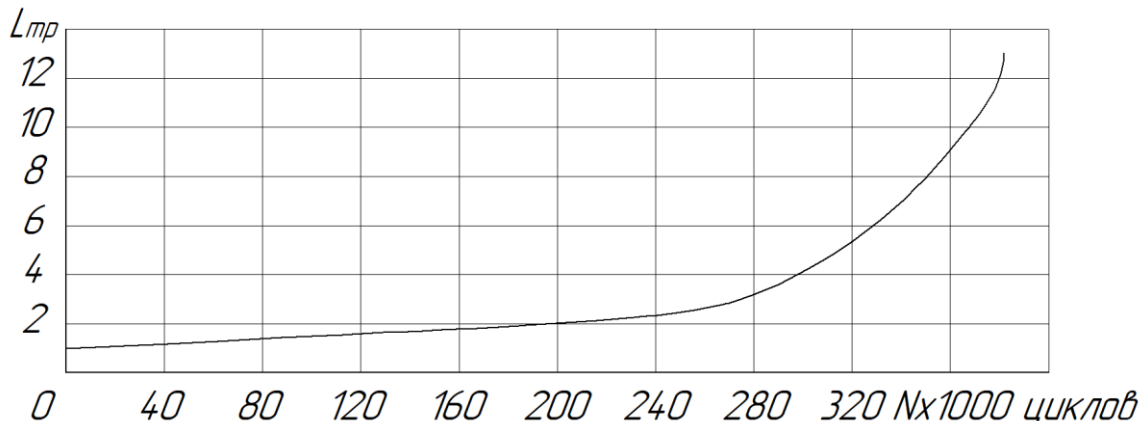


Рисунок 3 - Зависимость длины усталостной трещины от числа циклов усталостных испытаний.

Данные этого графика использовались для построения диаграмм усталостного разрушения стали. При этом расчеты проводились с учетом теоретических основ хрупкого разрушения А.А.Гриффитса [17] и на основании формулы выведенной Д.Ирвиним - зависимости длины трещины и напряжения в ее вершине [5]. Известно, что эти параметры связаны коэффициентом интенсивности напряжения K_I , величину которого можно определить по формуле

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} \quad (9)$$

где σ – номинальное напряжение в сечении, изменяющееся при росте трещины; l – длина усталостной трещины. Обычно величина σ определяется разностью между максимальным и минимальным значением напряжений возникающих в образце в процессе циклических испытаний на изгиб. Однако в нашем случае поскольку применялся отнулевой цикл нагружения, при котором минимальные напряжения были равны нулю. Поэтому в сечении образца при росте трещины возникали только положительные растягивающие напряжения, которые и использовались для определения коэффициента интенсивности напряжения K_I по формуле указанной выше.

В процессе обработки экспериментальных результатов приведенных на рис.3 были получены данные величины значений K_I в зависимости от длины усталостной трещины, растущей в процессе

усталостных испытаний. На основании этих данных построен график $\frac{dl}{dN} - \Delta K$, приведенный на рисунке 4, который обычно стоят в логарифмических координатах [11,14,18.с.63].

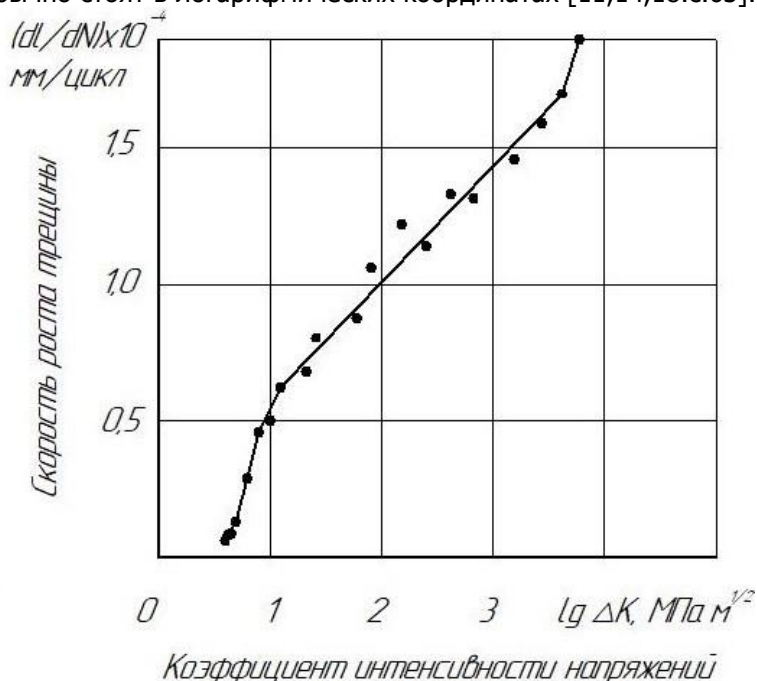


Рисунок 4 - Кривая усталостного разрушения экспериментального образца.

Разработанная методика позволяет получать данные необходимые для построения диаграмм усталостного разрушения образцов из сплавов на основе железа с целью изучения различных способов упрочнения и оценки их работоспособности в реальных условиях [18,19]. При этом данная методика позволяет с помощью компьютера легко рассчитывать экспериментальные данные необходимые для построения диаграмм усталостного разрушения изменяя параметры исследуемого образца (его размеры), а также величину амплитуды, параметры которой можно задавать в зависимости от режима термической обработки и твердости.

Полученные экспериментальные данные, приведенные на рис.4 хорошо согласуются с результатами, полученными ранее [20] по иной методике и на другом оборудовании.

Список использованных источников

1. Николаева Е.А. Основы механики разрушения. Издат. Пермского гос. технического ун-та. 2010г.
2. Потемкин А.Н., Викулов А.С., Никитин Д.Е. Усталостное разрушение материалов с позиции различных теорий // Научно-методический электронный журнал «Концепт». –2015. –Т.13. – С. 3311–3315. – URL: <http://e-koncept.ru/2015/85663.htm>.

3. Морозов Е.М. «ANSYS в руках инженера. Механика разрушения» — URSS, 2018. - 414 с.
4. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. М.: Металлургия 1978. -256 с.
5. Ирвин Дж., Парис П. Основы теории роста трещин и разрушения. В кн.: Разрушение. Т. 3 / Под общей ред. Г. Либовица. - М.: Мир, 1976. С. 17-66.
6. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. - М.: Физматлит, 2006. - 328 с.
7. Kamaya M. Lou-cycle fatigue crack growth prediction by strain intensity factor //Int.J.Fatigue.- 2015.-V.72.-P.80-89.
8. Установка для исследования кинетики развития трещины при испытаниях на циклический изгиб. Пустовойт В.Н., Гришин С.А., Дука В.В., Федосов В.В. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020, Т.86, №7, С.59-64.
9. Пустовойт В.Н., Гришин С.А., Зайцева М.В. Методика применения средств компьютерной графики для исследования течения нестационарных процессов в современном материаловедении /Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. 2011, Т.11, №5(6). – С/676-682.
- 10.Пустовойт В.Н., Гришин С.А., Зайцева М.В. Кинетика и механизм роста трещины в стали со структурой феррито-мартенситного композита. / Вестник ДГТУ. 2011. Т.11. №6. с.857-861.
- 11.Иванова В.С. Разрушение металлов. –М.: Металлургия, 1979. -168 с.
- 12.Поведение стали при циклических нагрузках. – М.: Металлургия, 1982. - 568 с.
- 13.Подскребко М.Д. Сопrotивление материалов: учебник. – Минск: Высш.шк., 2007. – 797 с.
- 14.Построение диаграммы усталостного разрушения моделей судовых валов. /М.А.Мамонтов, Т.А.Кужахметов, Р.У.Иксанов, Доан Ван Тинь. Вестник АГТУ. 2008. №5(46). С.44-49.
15. Лебедев Г.Д., Воробьев Н.А. К определению длины трещины методом разности электрических потенциалов при циклическом нагружении образца с односторонним сквозным боковым надрезом. /Заводская лаборатория: Диагностика материалов. – 2004. – №11. –С. 42-44.
- 16.Шкатов П.Н., Малиновский А.К., Мякушев К.В. Измерение глубины трещин электропотенциальным методом с учетом нескольких параметров, влияющих на регистрируемые напряжения/ Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. -№4(306). - С.133-138.
- 17.Griffith A.A. The phenomema of rupture and flowing solids. //Philosophical Transactions of Royal Society. – 1920. – A221. – P.163-198.
- 18.Гришин С.А. Повышение конструкционной прочности сталей термической обработкой в магнитном поле. – Ростов-на-Дону: ИВТ им.Г.Я.Седова, 2015. -81с.
- 19.Пустовойт В.Н., Гришин С.А., Долгачев Ю.В., Дука В.В. Усталостное разрушение стали со структурой феррито-мартенситного композита. Известия ВУЗов. Черная металлургия. -2022. 65.№2. С.92-97.
- 20.Пустовойт В.Н., Гришин С.А. Особенности методики проведения исследований процессов развития усталостной трещины. Известия ВУЗов. Черная металлургия. -1987. №8. С.75-79.