

Об использовании кривых Френча при прогнозировании циклической долговечности

К. П. Манжула

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

Обосновывается использование кривых Френча для прогнозирования многоциклового усталостной долговечности по моменту зарождения макротрещины. Кривая Френча рассматривается в качестве разделяющей области распространяющихся и нераспространяющихся трещин усталости. Предложен способ расчета параметров кривой Френча в малоциклового области нагружения через параметры кривой Коффина–Мэнсона.

Ключевые слова: усталостная прочность, циклическая долговечность, кривые Френча, Коэффициент–Мэнсона, Велера, распространяющиеся и нераспространяющиеся трещины.

Необходимость разделения процесса усталостного разрушения на стадии формирования и развития микро- и макротрещины была очевидной уже на ранних этапах исследований [1–6]. Основные сложности заключаются в экспериментальном обнаружении трещин малых размеров при усталостных испытаниях образцов и масштабных моделей и назначении критериев, по которым трещину можно классифицировать как переходную. Это приводит к тому, что в таких стандартах, как СНиП II-23-81, BSPD 6493, DIN 15018 и др., расчетная оценка многоциклового выносливости проводится только по условию непревышения наибольшим действующим приведенным напряжением допускаемого напряжения или расчетного сопротивления без учета реального спектра нагружения узла. При существенно нерегулярных или блочных спектрах нагружения осуществляется суммирование повреждений по различным гипотезам [3, 7–9], в которые в качестве определяющих параметров входят параметры кривой Велера (σ_R, m), что фиксирует расчетную оценку долговечности на моменте разрушения. Методическое несоответствие состоит в том, что расчетная оценка базируется на отсутствии усталостной трещины в конструкции, но фактически стадия развития трещины автоматически включена в уравнение кривой Велера для материала или узла конструкции. Отклонение расчетной оценки от экспериментальной компенсируется корректированием гипотез [8], использованием заниженных значений расчетного сопротивления усталости или допускаемого напряжения. Однако подобный подход вносит только неопределенность, например, при определении остаточного ресурса, когда трещины в конструкции не обнаружены, а характер нерегулярного переменного нагружения приблизительно или достаточно хорошо известен. Для корректной оценки долговечности по критерию появления трещины в локальной зоне должны использоваться параметры кривой усталости материала или узла, полученной по моменту зарождения трещины.

Отсутствие общих взглядов на построение такой кривой и ее положение на диаграмме усталостного разрушения в координатах $\sigma - N$ или $\varepsilon - N$ приводит иногда к принятию допущения о параллельности кривых зарождения макротрещины и окончательного разрушения [3], хотя экспериментальными данными это допущение не подтверждается [5, 6, 10].

В качестве кривой зарождения макротрещины, по мнению автора, может быть использована кривая Френча для много- и малоциклового области нагружения (рис. 1). Для многоциклового области нагружения кривая Френча была предложена в 1933 г. [4], описание способа ее построения можно найти, например, в [10], но экспериментально полученных данных, за исключением отдельных исследований [5, 11], практически нет. Необходимость использования кривой Френча для малоциклового области нагружения при расчете многоциклового выносливости обусловлена тем, что в местах концентрации напряжений (например, в околошовных зонах сварных соединений) при действии блока номинальных напряжений выше предела выносливости могут возникать локальные пластически деформированные зоны металла, закономерности деформирования которых соответствуют закономерностям упругопластического циклического деформирования образцов из этого металла.

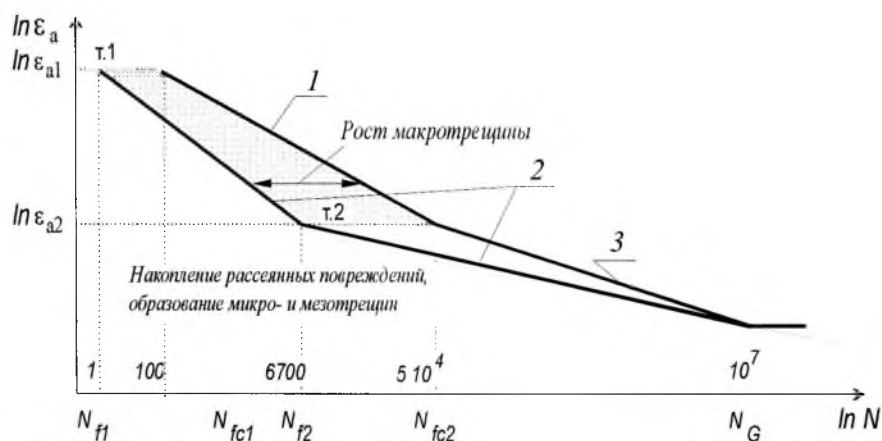


Рис. 1. Схематизированная диаграмма усталостного разрушения: 1 – кривая Коффина–Мэнсона; 2 – кривая Френча; 3 – кривая Велера.

Недостаточное внимание исследователей к кривой Френча объясняется неопределенностями трактовки областей диаграммы усталостного разрушения, разделяемых этой кривой, и взаимосвязи между размерами трещины (микро- и макротрещины, короткая, мелкая и трещина в мезоструктуре) и ее свойствами. Так, в работе [12] число циклов до зарождения макротрещины определяется по моменту появления трещины длиной 0,1–0,3 мм. Такой же минимальный размер макротрещины рекомендуется в [13]. Авторами работы [14] обосновывается начальный размер макротрещины, равный диаметру зерна d_3 структуры. В [6] предполагается, что кривая Френча характеризует начало образования микроскопических трещин, при этом отмечается, что отдельные трещины соизмеримы с зернами. В [15] кривая Френча опреде-

ляется как начало образования макротрещин. В [16] на основании уравнения для амплитуды порогового коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в полуэллиптической поверхностной трещине $K_{ath} = 0,65\sigma_{-1}\sqrt{\pi l_0}$ определяется диапазон начальных размеров трещины $l_0 = 0,01...0,03$ мм в зависимости от прочности стали. Близкие значения начальных размеров трещины получены при двухступенчатом нагружении [17].

Из анализа вышеприведенных и других работ следует, что минимальный размер макротрещины сопоставим с размером зерна структуры металла. Трещина полуэллиптическая или эллиптическая должна иметь фронт, пересекающий не менее 3–5 зерен структуры и такое же число граничных дислокационных скоплений.

При обосновании начального размера трещины, соответствующей кривой Френча, необходимо также учитывать способ построения последней, согласно которому образец вначале нагружается некоторым числом циклов с напряжением выше предела выносливости σ_R , а затем подвергается испытанию на уровне σ_R . Это позволяет обнаружить переходную область от трещин, распространяющихся на уровне предела выносливости, к трещинам, которые не распространяются. Как известно, в гладких образцах на пределе выносливости нераспространяющиеся трещины не наблюдаются, возникают только микротрещины в поверхностном слое [18]. Если учесть, что предел выносливости такого образца с ферритно-перлитной структурой соответствует циклическому пределу пропорциональности $\sigma_{-1} \approx \sigma_{\text{п.ц}}^{\text{н}} = \sigma_{0,015}^{\text{н}}$ [10], то очевидно, что для образования распространяющейся трещины необходимо наличие поля упругопластических или неупругих (петля гистерезиса при циклическом нагружении напряжениями $\sigma_{0,2} > \sigma > \sigma_{\text{п.ц}}^{\text{н}}$) деформаций.

Проведенный анализ показал, что на пределе выносливости развиваются трещины, обладающие свойствами макротрещины, т.е. имеющие глубину не менее характерного диаметра зерна структуры $l_0 > d_3$, фронт, пересекающий границы, не менее 3–5 зерен (в зависимости от типа трещины) и сформированную собственную зону циклически обратимой пластической деформации в вершине, что выражается условием $\Delta K \geq \Delta K_{th}$. При меньшем размере трещина не в состоянии преодолеть дислокационные скопления по границам зерен и, следовательно, не может стать макротрещиной. Следует ожидать, что размеры усталостных трещин для всех уровней напряжений на кривой Френча будут (со статистическим разбросом) близкими. Последнее утверждение справедливо для сталей циклически стабильных. Размеры неразвивающихся трещин для сталей, склонных к циклическому упрочнению или разупрочнению, могут быть разными. Однако стали строительные, низколегированные и малоуглеродистые, а также околосовые зоны сварных соединений из этих сталей имеют структуры циклически стабильные, слабо разупрочняемые или слабо упрочняемые, и поэтому размеры макротрещин в них будут примерно одинаковыми.

Для обнаружения количественных закономерностей кривых Френча и Велера проведены испытания на изгиб с вращением образцов $\varnothing 6,5$ мм в корсетной части, изготовленных из средних слоев листовой прокатной стали 10ХСНД толщиной 20 мм. На рис. 2 представлены кривые Велера и Френча,

построенные в логарифмических координатах $\varepsilon - N$. Как видно, кривые близко сходятся при базовом числе циклов $N_G = 10^7$ и имеют разные показатели степенных уравнений. Характер расположения кривых соответствует диаграмме [6, 15] и подтверждает известный факт, что период развития макротрещины у разрушившихся на пределе выносливости образцов составляет менее 10% общей долговечности. Уравнение кривой Френча для многоциклового участка, так же, как и уравнение кривой Велера, может быть представлено в напряжениях степенной зависимостью вида

$$\sigma_a^{m_{\sigma F}} N = C_{\sigma F}, \quad (1)$$

где $m_{\sigma F}$ и $C_{\sigma F} = \sigma_{-1}^{m_{\sigma F}} N_G$ – показатель и константа уравнения; σ_{-1} – предел выносливости на базе N_G .

С числовыми значениями параметров уравнения Велера и Френча имеют следующий вид:

$$(\sigma_a)^{11,64} N = 10^{35,627}; \quad (\sigma_{aF})^{18,55} N = 10^{52,707}.$$

Кривые Френча могут быть построены также в малоциклового области нагружения. Для этого можно использовать аналогичные корсетные образцы, но испытываемые при растяжении–сжатии. Существуют определенные трудности построения кривых Френча в малоциклового области на электро-механических машинах (например, типа УМЭ-10 тм), так как при сбрасывании нагрузки на предел выносливости время испытаний возрастает до практически нереальных значений. Необходимость наличия кривой Френча для малоциклового участка нагружения при расчетах многоциклового выносливости, как уже отмечалось, вызвана нагруженностью локальных зон концентраторов (например, околошовных зон сварных конструкций) в определенные периоды эксплуатации напряжениями выше предела текучести.

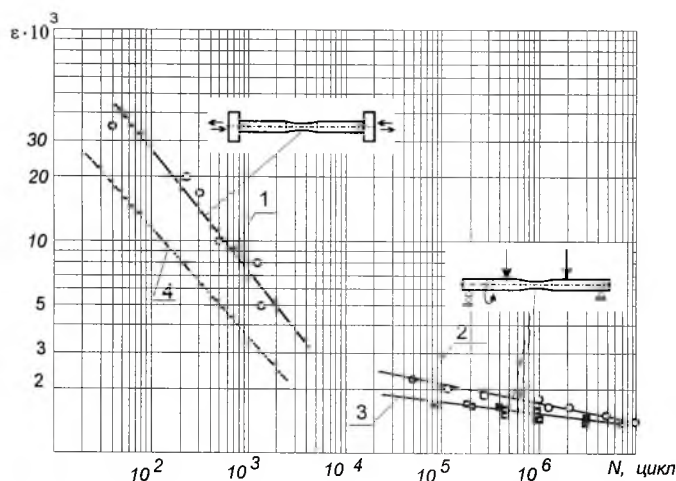


Рис. 2. Диаграмма усталостного разрушения стали 10XСНД: 1 – кривая Коффина–Мэнсона; 2 – кривая Велера; 3 – кривая Френча в многоциклового области нагружения; 4 – кривая Френча в малоциклового области нагружения, построенная по уравнению (4).

Покажем, как, основываясь на кривых Коффина–Мэнсона и Велера, а также на кривой Френча для многоциклового области нагружения, можно построить кривую Френча для малоциклового области.

Известны немногочисленные экспериментальные исследования по оценке связи между периодами зарождения трещины и окончательного разрушения [7, 19]. Например, Мэнсон [7], анализируя экспериментальные данные для различных материалов, период зарождения трещины определял по зависимости

$$N_3 = N_{fc} - 14(N_{fc})^{0,6} \quad \text{при } N_{fc} > 730 \text{ цикл}, \quad (2)$$

где N_{fc} – число циклов до окончательного разрушения. При $N_{fc} < 730$ цикл трещина, по Мэнсону, возникает в первом цикле нагружения.

Анализ зависимости (2) показывает, что при $N_{fc} = 3000$ цикл период зарождения трещины составляет 43% времени N_{fc} , что противоречит данным работ [7, 10, 20].

В [19] при сопоставлении стадии роста трещины в пластическом поле надреза и последующего ее роста в поле упругих деформаций образца установлена зависимость

$$N_F = 1,42 \cdot 10^{-3} (N_{fc})^{1,42}, \quad (3)$$

где N_F – число циклов до образования макротрещины; N_{fc} – число циклов до разрушения. Согласно этому уравнению трещина, зародившаяся в первом цикле нагружения, приводит к окончательному разрушению при $N_{fc} = 100$ цикл. Это согласуется с результатами, полученными большинством авторов, о зарождении трещины в квазистатической области в первые циклы нагружения.

Используем уравнение (3) для расчета кривой Френча в малоциклового области по кривой Коффина–Мэнсона.

Уравнение кривой Френча в малоциклового области запишем в виде

$$\varepsilon_a N^{m_{\varepsilon F}} = C_{\varepsilon F}, \quad (4)$$

где $m_{\varepsilon F}$ и $C_{\varepsilon F}$ – константы уравнения в малоциклового области; ε_a – амплитуда полной (упругой и пластической) деформации. На рис. 1 показана прямая, соответствующая этому уравнению. Выражая константу $C_{\varepsilon F}$ через координаты точек 1 (ε_1, N_1) и 2 (ε_2, N_2) – рис. 1 и подставляя ее в уравнение (4), получаем

$$\varepsilon_{a1}(N_1)^{m_{\varepsilon F}} = C_{\varepsilon F}; \quad \varepsilon_{a2}(N_2)^{m_{\varepsilon F}} = C_{\varepsilon F}. \quad (5)$$

Показатель степени $m_{\varepsilon F}$ в (5) записывается в виде

$$m_{\varepsilon F} = \frac{\ln \varepsilon_{a1} - \ln \varepsilon_{a2}}{\ln N_2 - \ln N_1} = \ln \frac{\varepsilon_{a1}}{\varepsilon_{a2}} / \ln \frac{N_2}{N_1}, \quad (6)$$

где деформации ε_{a1} и ε_{a2} определяются из уравнения Коффина–Мэнсона (рис. 1)

$$\varepsilon_{a1} = C_\varepsilon / (N_{fc1})^{m_\varepsilon}; \quad \varepsilon_{a2} = C_\varepsilon / (N_{fc2})^{m_\varepsilon}. \quad (7)$$

Подставляя их в зависимость (7), получаем

$$m_{\varepsilon F} = \frac{\ln(N_{fc1}/N_{fc2})^{m_\varepsilon}}{\ln(N_1/N_2)}. \quad (8)$$

Примем долговечность $N_{fc1} = 100$ цикл. В соответствии с уравнением (3) ей соответствует $N_1 = 1$ цикл. В качестве точки 2 удобно выбрать точку перехода малоциклового участка нагружения к многоциклового, т.е. $N_{fc2} = 5 \cdot 10^4$ цикл, которой из (3) соответствует $N_1 = 6700$ цикл. Подставив эти значения в зависимость (8), имеем

$$m_{\varepsilon F} = 0,11 \ln(500^{m_\varepsilon}). \quad (9)$$

Постоянную $C_{\varepsilon F}$ также можно определить через константу C_ε , если подставить в зависимость (9) деформацию ε_{a1} из уравнений (5) и (7),

$$C_{\varepsilon F} = C_\varepsilon \cdot 100^{-m_\varepsilon}. \quad (10)$$

С использованием полученных уравнений определим параметры кривой Френча в малоциклового участка для стали 10ХСНД. По результатам малоциклового испытания при симметричном осевом нагружении цилиндрических образцов с центральной корсетной частью $\varnothing 6,5$ мм, изготовленных из листовой прокатной стали 10ХСНД, построена кривая Коффина–Мэнсона (рис. 2). Параметры кривой Коффина–Мэнсона для амплитуды полной деформации ε составили: $m_\varepsilon = 0,459$; $C_\varepsilon = 0,191$, тогда как параметры кривой Френча по уравнениям (9) и (10) – $m_{\varepsilon F} = 0,322$, $C_{\varepsilon F} = 0,023$.

Выводы

1. Предложено определять усталостные характеристики сталей на момент зарождения усталостных макротрещин по кривым Френча. Обосновано положение линии Френча как линии, разделяющей области зарождения и развития макротрещины.

2. Показана непараллельность кривых Френча и Велера при испытаниях стали 10ХСНД.

3. Предложен способ определения параметров кривой Френча в малоциклового участка деформирования через параметры кривой Коффина–Мэнсона.

Резюме

Обґрунтовується використання кривих Френча для прогнозування багаточислової довговічності від утомленості за моментом зародження макро-

тріщини. Крива Френча розглядається у вигляді такої, що поділяє області розповсюджуваних і нерозповсюджуваних тріщин втомленості. Запропоновано спосіб розрахунку параметрів кривої Френча в малоцикловій області навантаження через параметри кривої Коффіна–Менсона.

1. *Grover H. J.* An observation concerning the cycle ratio in cumulative damage // *Fatigue in Aircraft Structures*, STR 274. – 1960. – P. 120 – 124.
2. *Ярема С. Я.* Стадийность усталостного разрушения и ее следствия // *Физ.-хим. механика материалов*. – 1973. – № 6. – С. 66 – 72.
3. *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках* / Под ред. В. И. Труфякова. – Киев: Наук. думка, 1990. – 255 с.
4. *French H.* Fatigue and gardening of steels // *Trans. ASTM*. – 1983. – **21**. – P. 889 – 946.
5. *Lukas P. and Kunz L.* Vrubovy soucinitel ve vysokocyklove unave. – *Ibid.* – 1980. – **18**. – S. 591 – 601.
6. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
7. *Коллинз Дж.* Повреждение материала в конструкциях. Анализ, предсказания, предотвращение. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
8. *Козаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 244 с.
9. *Гохберг М. М.* Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. – Л.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
10. *Циклические деформации и усталость металлов*: В 2-х т. – Т. 1. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов. Т. 2. Циклические деформации и усталость металлов / В. Т. Трощенко, Л. А. Хамаза, В. В. Покровский и др. – Киев: Наук. думка, 1985. – Т. 1. – 216 с. – Т. 2. – 224 с.
11. *Klesnil M.* The degree of damage at the French curve and at the fatigue limit during oscillating bend loading // *Metal Treatment Drop Forging*. – 1965. – **32**. – P. 55 – 63.
12. *Панасюк В. В., Остаиш О. П., Костык Е. М.* Зарождение усталостных трещин у концентраторов напряжений // *Физ.-хим. механика материалов*. – 1985. – № 6. – С. 3 – 10.
13. *Блехман М. Х., Инденбом В. Л.* Взаимодействие дислокаций на малых расстояниях и зарождение трещин // *Физика твердого тела*. – 1974. – **16**, № 9. – С. 2678 – 2688.
14. *Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А.* Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
15. *Горицкий В. М., Терентьев В. Ф.* Структура и усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.

16. *Механика разрушения и прочность металлов. Справ. пособие: В 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988 – 1990. – Т. 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. – 1990. – 680 с.*
17. *Misawa H. and Kawada Y. The crack propagation by the stress amplitude below the fatigue limit // Bull. JSME. – 1974. – 17, No. 106. – P. 434 – 441.*
18. *Кудрявцев П. И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.*
19. *Миллер К. Ползучесть и разрушение. – М.: Металлургия, 1986. – 120 с.*
20. *Иванова В. С. Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Металлургия, 1992. – 256 с.*

Поступила 17. 01. 2003