

Зернограничный механизм роста усталостной трещины

В.Г. Кульков, В.В. Кулькова, Дж.Ш. Норев

Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в г. Волжском

Аннотация: Провода воздушных линий электропередачи испытывают воздействие различных внешних факторов, таких как ветер, ледяные отложения, переменный температурный режим, избыточная влажность. В конечном итоге это приводит к усталостному разрушению провода. Оно заключается в зарождении и медленном подрастании усталостной трещины. Конечной стадией разрушения является внезапное движение трещины с большой скоростью. В работе предлагается модель медленного роста трещины, в устье которой находится граница зерен. Под действием внешнего напряжения участок границы является источником вакансий. Возникающий градиент концентрации вакансий между границей зерен и свободной поверхностью в устье трещины приводит к диффузионному потоку вакансий в трещину. Из решения диффузионной задачи находится величина потока и скорость увеличения длины трещины.

Ключевые слова: трещина, граница зерна, диффузия вакансий, усталостное разрушение, воздушная линия, механическое напряжение, поток вакансий.

Усталостным старением оборудования называется процесс накопления в нем внутренних повреждений в виде трещин и очагов коррозии в ходе его эксплуатации, которое может вызвать внезапное критическое разрушение всей конструкции. Причиной такого явления выступают образовавшиеся в материале трещины, жизненный цикл которых можно разделить на три весьма неравномерных по скорости протекания этапа: зарождение, докритическое и закритическое развитие [1, 2]. Первые два этапа относятся к стадии вязкой деформации и протекают достаточно медленно [3], не оказывая существенного влияния на эксплуатационные характеристики оборудования. Однако, при достижении трещиной критического размера, ее дальнейшее развитие происходит по законам хрупкого разрушения, скорость которого может превышать скорость звука [1].

Анализ аварий на воздушных линиях электропередачи показывает, что 51% отказов этих систем приходится на провода [4], которые достаточно часто обрываются в точках крепления к стационарным опорам. Воздействие

таких внешних факторов, как ветер, оледенение, перепады температур и сила тяжести, создают этих местах сложное нестационарное поле изгибающих и растягивающих напряжений [5, 6, 7] эквивалентное многоцикловой нагрузке, при которой порог внутренних напряжений, вызывающих усталостное старение материала, существенно снижен до значений меньших предела текучести.

Таким образом, углубление представлений о механизмах и скорости роста трещины в докритической области позволяет более точно оценить эксплуатационный резерв материала, что оказывает положительное влияние на эффективность и безопасность работы оборудования любой отрасли.

Местами зарождения внутренних трещин традиционно выступают такие зернограничные дефекты, как поры, тройные стыки зерен, конгломераты примесей [8, 9, 10].

Рассмотрим участок границы зерен длины L , расположенный нормально к оси провода между точками A и B . На рис. 1 изображено нормальное к границе и трещине сечение системы. В точке A граница выходит к вершине трещины, которую считаем закругленной. В точке B расположен другой линейный дефект, например, тройной стык зерен или выделение второй фазы. Нормально к границе приложено напряжение:

$$\sigma(t) = \sigma_1 + \sigma_0 \cos(\omega t). \quad (1)$$

Здесь ω – частота, t – время. Первое слагаемое – постоянная составляющая напряжения растяжения провода, вторая – переменная составляющая, обусловленная его колебаниями.

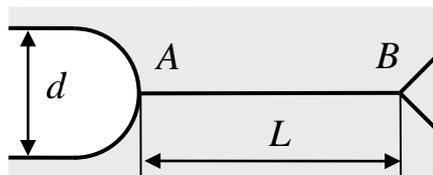


Рис. 1. – Изображение участка границы, сопрягающегося с вершиной трещины

Под действием растягивающей составляющей σ_1 на участке границы AB генерируются вакансии, которые могут стекать в точке A в вершину трещины. Считаем, что в точке B поток вакансий пренебрежимо мал. Вблизи цилиндрической поверхности вершины трещины действует лапласово напряжение растяжения:

$$\sigma_s = \frac{2\gamma_s}{d}, \quad (2)$$

где γ_s – удельная свободная энергия поверхности, d – ширина трещины. С таким напряжением связана избыточная концентрация вакансий [11]:

$$C_s = \frac{C_0 \Omega \sigma_s}{kT}. \quad (3)$$

Здесь C_0 – равновесная концентрация вакансий в поверхностном слое трещины, Ω – атомный объем, k – константа Больцмана, T – температура.

Условием возникновения диффузионного потока вакансий из границы в точке A является превышение избыточной концентрации вакансий в границе зерен C_b над C_s : $C_b > C_s$. Здесь C_b – избыточная по сравнению с равновесной C_{0b} концентрация вакансий в границе. Это дает условие для величины постоянного растягивающего напряжения:

$$\sigma_1 > \sigma_s. \quad (4)$$

Совместим ось x с направлением отрезка AB , начало совместим с точкой A . С напряжением (1) связано действие источников вакансий на границе. Рассмотрим сначала действие постоянного во времени источника. Уравнение диффузии в стационарном случае имеет вид:

$$D_b \frac{d^2 C'_b(x)}{dx^2} = -\alpha \sigma'_1, \quad (5)$$

где D_b – коэффициент зернограничной диффузии вакансий, $C'_b = C_b - C_s$, $\sigma'_1 = \sigma_1 - \sigma_s$. Правая часть в (5) обозначает плотность источника вакансий в границе, α – искомый коэффициент. Граничные условия в точках A и B :

$$C'_b(0) = 0, \quad \frac{dC'_b(L)}{dx} = 0. \quad (6)$$

Решением задачи (5), (6) является функция

$$C'_b(x) = \frac{\alpha\sigma'_1}{2D_b} x(2L - x). \quad (7)$$

Локальное напряжение в границе связано с концентрацией вакансий соотношением, подобным (3). Запишем условие равенства полной распределенной по отрезку AB силы внешнему усилию:

$$\int_0^L \frac{kT}{C_{0b}\Omega} C'_b(x) dx = L\sigma'_1, \quad (8)$$

из которого находим $\alpha = \frac{3D_b C_{0b}\Omega}{L^2 kT}$. Тогда координатная зависимость концентрации под действием постоянного напряжения σ_1 принимает вид:

$$C'_b(x) = \frac{3C_{0b}\Omega\sigma'_1}{2L^2 kT} x(2L - x). \quad (9)$$

Рассматривая большие промежутки времени, намного превышающие период колебаний T , можно заменить действие переменной составляющей (1) средним за период значением относительно σ_t .

$$\frac{1}{T} \int_0^T (\sigma_1 + \sigma_0 \cos(\omega t) - \sigma_t) dt = \sigma_1 - \sigma_S = \sigma'_1. \quad (10)$$

Выражение избыточной концентрации для этого случая совпадает с (9). Поток вакансий из границы в объем можно пренебречь, если $\delta D_b \gg LD$, где D – объемный коэффициент диффузии вакансий. Если трещина открытая и сообщается с атмосферой, то в ней содержится кислород. Поверхность трещины покрыта слоем оксида алюминия атомной толщины. Вследствие большой прочности слоя сокращение его площади – более медленный процесс, чем рост. Поэтому мы здесь пренебрегаем процессами залечивания трещины, возможными в моменты, когда $\sigma(t) < \sigma_S$.

Найдем поток вакансий в устье трещины через левую границу A за единицу времени $j = D_b \delta z \frac{dC'_b(0)}{dx}$, где δ – диффузионная ширина границы, z – размер трещины в направлении, нормальном рисунку. Скорость увеличения объема трещины $\frac{dV}{dt} = j\Omega$. Учитывая ширину трещины d , находим скорость приращения ее длины:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{3D_b C_{0b} \delta \Omega^2}{LdkT} \left(\sigma_1 - \frac{2\gamma_s}{d} \right). \quad (11)$$

Предложенная модель позволяет оценить скорость роста размера трещины докритической длины при многоцикловогой нагрузке. Согласно полученному результату скорость роста экспоненциально зависит от температуры, благодаря наличию в выражении (11) коэффициента диффузии D_b и обратно пропорциональна эффективному размеру участка границы зерен L .

Литература

1. Финкель В.М. Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
2. Matthew J. Markham, Ali Fatemi, Nam Phan. Mixed-Mode small fatigue crack growth rates and modeling in additively manufactured metals // International Journal of Fatigue. Volume 183. 2024. P. 108258.
3. Huai-Rong Xiao, Li-Xun Cai. Study on the creep crack growth testing of metals based on direct and indirect methods // Engineering Fracture Mechanics. Volume 309. 2024. P. 110435.
4. Хамидуллин И. Н., Ильин В. К. К вопросу о надежности воздушных линий электропередачи 35-500 КВ // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 1. С. 45-53.



5. Rossi A., Jubayer Ch., Koss H., Arriaga D., Hangan H. Combined effects of wind and atmospheric icing on overhead transmission lines // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Volume 204. 2020. P. 104271.

6. Бердыченко А. А. Иванов С. Г., Гурьев М. А. Исследование причин разрушения подвесов проводов ЛЭП методами структурно-фазового металлографического анализа // Ползуновский вестник. 2021. № 1. С. 147-153.

7. Кульков В. Г., Тышкевич В. Н., Курьянов В. Н. и др. Экспериментальные исследования усталостной прочности и поверхностного электросопротивления алюминиевого провода воздушных линий электропередач // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. №4 С. 189-195.

8. Полетаев Ю.В. Влияние температуры и частоты малоциклового нагружения на склонность к локальному разрушению сварных соединений стали 12X18H12T // Инженерный вестник Дона. 2011. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/587

9. Kwai S. Chan. Roles of microstructure in fatigue crack initiation // International Journal of Fatigue. 2010. Volume 32. Issue 9. pp. 1428-1447.

10. Полетаев Ю.В. Механизм локального разрушения зоны термического влияния сварных соединений при малоцикловом нагружении // Инженерный вестник Дона. 2011. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/606/

11. Черемской П. Г., Следов В. В., Бетехтин В. И. Поры в твердом теле М.: Энергоатомиздат, 1990. 376 с.

References

1. Finkel' V.M. Fizika razrusheniya [Physics of destruction]. М.: Metallurgiya, 1970. 376 p.



2. Matthew J. Markham, Ali Fatemi, Nam Phan. International Journal of Fatigue. 2024. Volume 183. P. 108258.
3. Huai-Rong Xiao, Li-Xun Cai. Engineering Fracture Mechanics. 2024. Volume 309. P. 110435.
4. Hamidullin, I. N. Ehlektrotekhnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy. 2016. Volume 12. Issue 1. pp. 45-53.
5. Rossi A., Jubayer Ch., Koss H., Arriaga D., Hangan H. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Volume 204. 2020. P. 104271.
6. Berdychenko A. A. Ivanov S. G., Gur'ev M. A. Polzunovskij vestnik. 2021. Issue 1. pp. 147-153.
7. Kul'kov V. G., Tyshkevich V. N., Kur'yanov V. N. i dr. Nadezhnost' i bezopasnost' ehnergetiki. 2021. Volume 14. Issue 4. pp. 189-195.
8. Poletaev Yu.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2011. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/587
9. Kwai S. Chan. International Journal of Fatigue. 2010. Volume 32. Issue 9, pp. 1428-1447.
10. Poletaev Yu.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2011. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/606/
11. Cheremskoj P. G., Sledov V. V., Betekhtin V. I. Pory v tverdom tele [Pores in a solid]. М.: Ehnergoatomizdat, 1990. 376 p.

Дата поступления: 2.09.2024

Дата публикации: 12.10.2024