

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Ш.Г. ГАСАНОВ, канд. техн. наук, доцент

Бакинский филиал Московского государственного открытого университета
irakon63@hotmail.com

Разработана расчетная методика оценки усталостной прочности дорожного покрытия в процессе эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожное покрытие, усталостная прочность, усталостная трещина, разрушение твердых тел, циклическое нагружение, критерии разрушения.

В последние годы при проектировании различных строительных конструкций все более интенсивное распространение получают методы оценки их работоспособности на основе прогнозирования роста усталостных трещин. Практическая важность таких методов заключается, прежде всего, тем, что в современных условиях нельзя с абсолютной надежностью исключить появление дефектов типа трещин еще в стадии изготовления или на самых ранних этапах эксплуатации конструкций. В этом случае отыскание периода докритического роста трещин имеет существенное значение для оценки срока службы конструкции.

Отметим некоторые сведения [1] о стадиях роста усталостной трещины.

Разрушение твердых тел под действием нагрузки происходит, как правило, не мгновенно и представляет собой относительно длительный процесс зарождения и развития дефектов типа трещин в теле. Особенно четко это наблюдается при циклической нагрузке.

Обычно усталостное разрушение делят на три стадии [2].

В первой стадии разрушения происходит деформация путем скольжения, которое сосредоточено в полосах, возникающих в приповерхностных слоях тела. Процессы первой стадии определяются возникновением и движением дислокаций. Во второй стадии начинается процесс зарождения субмикротрещин.

Субмикротрещины образуются там, где из-за локальной несовместности деформаций и концентрации напряжений, вызванных микронеоднородностью и дефектностью структуры, происходит деформация в результате слияния дислокаций, а также образования разрывов. Трещины появляются на поверхности у выхода полос скольжения. Мельчайшие трещины или подобные им остроконечные дефекты могут образоваться еще во время формирования материала и его обработки или сразу после нагружения в микрообластях резкого нарушения однородности, концентрации остаточных напряжений. Затем субмикротрещины растут и сливаются, превращаясь в микротрещины. Чем больше размер трещины, тем меньше становится их количество. Третья стадия разрушения начинается, когда одна (или несколько) микротрещина перерастает в макротрещину. В этой стадии все процессы концентрируются у фронта макротрещины, а разрушение происходит за счет ее стабильного роста. Третья стадия заканчивается, когда трещина достигает критического размера.

Первый период контролируется в большинстве случаев касательными напряжениями, а второй период нормальными напряжениями. Макроскопическое развитие трещины происходит в плоскости действия максимальных растягивающих напряжений. Трещины на первоначальной стадии образуются по плоскостям максимальных касательных напряжений, но после продвижения в тело детали на глубину порядка одного–двух зерен совершается переход на вторую стадию, на которой трещина распространяется перпендикулярно направлению максимального растягивающего напряжения. Следовательно, на зарождение, направление и скорость роста усталостных трещин решающее влияние оказывает напряженно-деформированное состояние конструкции.

Качественный шаг в исследованиях роста усталостных трещин был сделан в 1961 г. П.С. Пэрисом с сотрудниками, высказавшими следующий принцип [3]: «Поскольку при циклическом нагружении напряжения и деформации вблизи вершины полностью определяются коэффициентом интенсивности напряжений и коэффициентом асимметрии цикла, разумно предположить, что всякое событие, происходящее в этой области, контролируется этими параметрами. Таким событием есть прирост трещины за цикл нагружения».

К настоящему времени предложено около тридцати уравнений скорости роста усталостных трещин, претендующих на описание всех трех участков кинетической диаграммы усталостного разрушения. При эксплуатации автомобильных дорог дорожное покрытие испытывает многократные циклические нагружения. Поэтому дорожная одежда должна иметь достаточное сопротивление усталостному разрушению при циклических воздействиях. При проектировании дорожной одежды автомобильных дорог необходимо учитывать возможность значительного снижения работоспособности дорожного покрытия из-за наличия дефектов типа трещин. Вместе с тем появление трещины еще не означает полного выхода дорожного покрытия из строя. Как правило, окончательному разрушению предшествует достаточно длительный период медленного роста трещины до критических размеров. В связи с этим исследование кинетики усталостного разрушения и расчет периода до критического роста усталостной трещины имеют большое практическое значение, так как позволяют прогнозировать долговечность дорожного покрытия в заданных условиях эксплуатации и открывают новые возможности по оптимизации работоспособности дорожной одежды. Долговечность дорожного покрытия выражают в массе груза (тоннаже) T , пропущенном через данный участок дороги. Так как каждый цикл нагружения соответствует прохождению через расчетное сечение одной колесной пары, то имеем

$$T = P_0 N_f / g, \quad (1)$$

где N_f – число циклов нагружения; P_0 – средневзвешенная осевая нагрузка; g – ускорение земного притяжения.

Согласно формуле (1) определение долговечности дорожного покрытия сводится к расчету числа циклов нагружения, при котором дефект типа трещины прорастает от некоторого начального до критического размера. Для определения величины N_f используем аппарат механики разрушения [1 – 3].

При разработке расчетной методики принимаем следующие общепринятые предположения при оценке усталостной прочности:

1. Размер области пластических деформаций у вершины трещины значительно меньше ее размеров, что позволяет решать поставленную задачу в рамках механики хрупкого разрушения (уровень напряженно-деформированного состояния определяется коэффициентами интенсивности напряжений K_I, K_{II}).

2. Приложенные к поверхности покрытия нагрузки циклически изменяются во времени, причем частота нагружения не слишком высокая и инерционные эффекты можно пренебречь.

3. Распространение трещины определяется максимальным коэффициентом интенсивности растягивающих напряжений K_p . Трещина будет расти в пределах одного цикла нагружения под углом β_* к своей оси вдоль площадки, на которой возникают максимальные растягивающие напряжения.

4. При проведении расчетов под длиной ℓ понимается эффективная глубина трещины в покрытии, равная проекции истинной ее глубины на нормаль к поверхности дорожного покрытия.

5. Скорость роста трещины $\nu = d\ell/dN$ описывается по модифицированной формуле Ли [4] в следующем виде:

$$d\ell/dN = A \left[K_{p_{\max}}^{-n} - K_{th}^{-m} \right], \quad (2)$$

где величины β_* и K_p определяются по формулам [7]:

$$\beta_* = 2 \arctg \left[\left(1 - \sqrt{1 + 8k^2} \right) / 4k \right], \quad (3)$$

$$K_p = \cos^2(\beta_*/2) \left[K_I \cos \beta_*/2 - 3K_{II} \sin \beta_*/2 \right], \quad (4)$$

$k = K_{II}/K_I$; $K_I > 0$; $K_{p_{\max}}$ – максимальное значение K_p ; K_{th} – пороговый коэффициент интенсивности напряжений при циклическом нагружении (порог усталости); $R = K_{p_{\min}}/K_{p_{\max}}$ – коэффициент асимметрии цикла; $K_{p_{\min}}$ – минимальное значение K_p цикла; A, m, n – являются характеристиками материала и устанавливаются на основании эксперимента.

Коэффициенты интенсивности напряжений K_I и K_{II} для вершины трещины в покрытии были ранее найдены в [5, 6]. Анализ этих соотношений показывает, что имеются достаточные условия для развития трещины, расположенной в любой точке поверхности трения. Это подтверждает известные [8] опытные данные о наличии на площадке трения множества мелких трещин. Благоприятные условия для роста оказываются у трещины, находящейся в области максимальных растягивающих напряжений. Поэтому при расчете принимается расположение трещины в нормальном направлении к поверхности трения.

Для определения долговечности N_f дорожного покрытия кроме кинетики роста усталостной трещины необходимо еще знать ее критический размер ℓ_* , при достижении которого наступит предельно-равновесное состояние покрытия. Из критерия разрушения

$$K_{p_{\max}} = K_{fc} \quad (5)$$

находим уравнение для нахождения критического размера ℓ_* трещины

$$\cos^2(\beta_*/2) \left[K_I \left(\frac{\ell_*}{2} \right) \cos \beta_*/2 - 3K_{II} \left(\frac{\ell_*}{2} \right) \sin \beta_*/2 \right] = K_{fc}, \quad (6)$$

где K_{fc} – критический коэффициент интенсивности напряжений при циклическом нагружении (циклическая вязкость разрушения), определяется опытным путем.

Для определения долговечности покрытия следует проинтегрировать дифференциальное уравнение (2) при следующем начальном условии при $N_f = 0$; $\ell = \ell_0$, где ℓ_0 – начальный размер дефекта типа трещины, определяемый методами неразрушающего контроля. В качестве расчетного размера для ℓ_0 можно принимать размер наиболее крупной фракции заполнителя в бетоне и т.п.

Для определения долговечности дорожного покрытия получим следующую формулу

$$N_f = \int_{\ell_0}^{\ell_*} A^{-1} \left[K_{p_{\max}} \left(R \right)^n - K_{th} \right]^{-m} d\ell. \quad (7)$$

Расчет проводится на ЭВМ с заданными шагами по фактической глубине трещины ℓ . Для этого задаем начальную глубину трещины ℓ_0 и шаг расчета $\Delta\ell$. При выбранной ℓ_0 рассчитываем для начального цикла величины $K_{p_{\max}}$ и $K_{p_{\min}}$. По формуле (7) определяем приращение циклов нагружения ΔN_1 .

Находим новую эффективную длину трещины $\ell_1 = \ell_0 + \Delta\ell \cdot \cos \beta_*$. Затем расчет повторяем для второго шага, третьего и т.д. до тех пор, пока коэффициент интенсивности напряжений $K_{p_{\max}}$ не окажется равным K_{fc} или длина трещины не станет равной критическому значению ℓ_* . По найденным величинам числа циклов нагружения до разрушения находим долговечность

$$N_f = \sum_{i=1}^M \Delta N_i; \quad M = \frac{\ell_* - \ell_0}{\Delta\ell}. \quad (8)$$

Расчеты проводились применительно дороге I типа с покрытием из плотно-го асфальтобетона.

В расчетах на основе опытных данных по усталостному испытанию мелко-зернистого асфальтобетона (модуль упругости $E_1 = 1500 \text{ МПа}$) было принято

$$\ell_0 = 0,15 \text{ мм}; \quad A = 3,16 \cdot 10^{-7} \left(\text{МПа} \sqrt{\text{м}} \right)^m \text{ м/цикл}; \quad m = 2,35; \quad n = 0,9;$$

$$K_{fc} = 1,15 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}; \quad K_{th} = 0,27 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}.$$

На основании таких расчетов можно найти период безопасной эксплуатации дорожного покрытия (ее остаточный ресурс) при наличии дефекта заданной формы и размера

$$t = N_f / t_T, \quad (9)$$

где t_T – средняя частота циклических нагрузок в условиях эксплуатации автомобиля. Результаты расчетов для дорожного покрытия представлены на рис. 1.

Такие расчеты позволяют определять допустимую начальную длину трещины, которая обеспечивала бы заданный ресурс работы автомобильных дорог. Так как осевая нагрузка и свойства динамичности для каждого автомобиля различны, изменение напряжений (изгибающего момента) в поперечном сечении дорожного покрытия имеет нерегулярный характер, а его амплитудные значения являются величинами случайными. В условиях многоциклового нагруже-

ния эти отклонения, а также случайные перегрузки, связанные с прохождением особо тяжелых грузов и т.п., играют незначительную роль. Поэтому для определения живучести покрытия допустимо исходить из упрощающегося предположения, что значение действующей нагрузки на колесо величина постоянная, усредненная из заданных условий эксплуатации дороги $P_k = K_d P_0 / 2$.

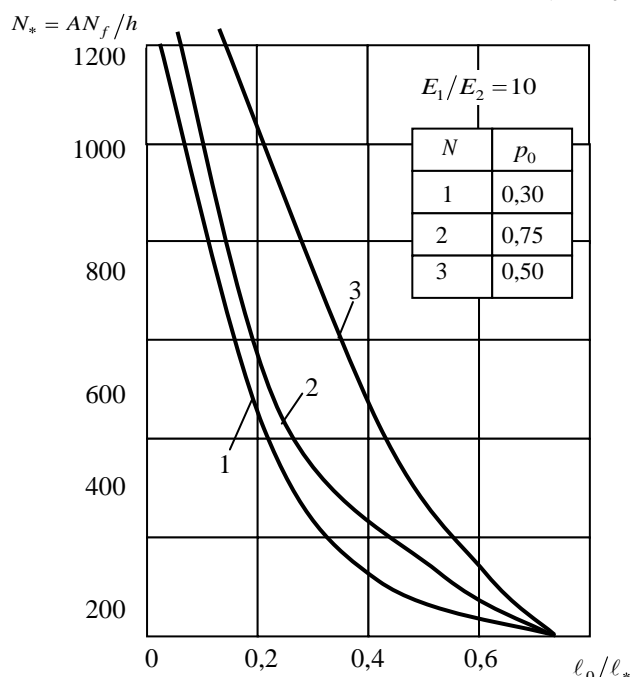


Рис. 1. Влияние безразмерной начальной длины трещины на безразмерную долговечность $N_* = AN_f/h$ дорожного покрытия с поверхностной трещиной при разной величине безразмерной нагрузки $p_0 = \sigma_{\max} \sqrt{\pi h} / K_{fc}$

Так как дорожная одежда работает в условиях многоциклового нагружения, то консервативную оценку допустимых размеров трещин можно дать, исходя непосредственно из условия нераспространения усталостных трещин в рабочем режиме циклического нагружения $K_{p \max} \leq K_{th}$.

Учитывая произвольность размеров и упругих характеристик покрытия, результаты проведенного анализа могут служить основой для исследования влияния, например, толщины слоя на прочность, или, например, влияния промежуточного слоя асфальтобетона на прочность дорожной одежды, а также многих других практически важных проблем, относящихся к проектированию и технологии возведения многослойных строительных конструкций.

Численное исследование роста усталостной трещины показывает, что при небольшом еще числе циклов нагружения трещина имеет тенденцию к развитию на небольшой глубине параллельно контактной поверхности. С повышением контактного давления на поверхности трения усталостное сопротивление уменьшается.

При большом числе циклов нагружения трещина растет в глубину вдоль перпендикулярного направления, т.е. значение угла β_* стремится к нулю.

Расчет скорости усталостной трещины (2) показывает, что более короткие усталостные трещины растут более быстро. Для роста усталостных трещин можно выделить две стадии. На первой стадии в интервале коротких трещин наблюдаются максимум и минимум скорости роста от длины трещины. Для

второй стадии зависимость скорости роста трещины монотонна. Эти данные согласуются с опытными данными Хоппнера, Элиса и Хоули [9], полученными для других материалов. В первой стадии проявляется снижение скорости роста трещин при высоких контактных давлениях. Это объясняется, по-видимому, тем что, начиная с некоторого значения контактного давления, сжимающие напряжения преобладают над растягивающими, и трещина стремится закрыться.

Результаты определения хрупкой прочности и долговечности дорожного покрытия, полученные по изложенным выше расчетным методикам, могут составить научную основу для разработки мер по предотвращению внезапных разрушений дорожной одежды в условиях эксплуатации, повышению надежности их работы.

Разработанная расчетная методика позволяет решить следующие практические важные задачи: *на стадии проектирования* – 1) оценивать гарантированный ресурс дорожного покрытия с учетом ожидаемых дефектов и условий нагружения; 2) установить допустимый уровень дефектности и максимальные значения рабочих нагрузок, обеспечивающие запас надежности; 3) проводить выбор материала с необходимым комплексом статических и циклических характеристик трещиностойкости; *на стадии изготовления* – 1) корректировать технологические процессы в направлении снижения остаточных напряжений и повышения характеристик трещиностойкости; 2) с помощью методов неразрушающего контроля определять параметры существующих дефектов; 3) оценивать степень их опасности; *на стадии эксплуатации* – 1) устанавливать периодичность и режимы профилактического контроля с целью своевременного выявления развивающихся дефектов; 2) принимать решения о целесообразности дальнейшей эксплуатации покрытий с такими повреждениями.

Практическая реализация отмеченных мер в значительной степени будет способствовать повышению эффективности и надежности работы дорожного покрытия и открывает возможности по дальнейшей их оптимизации. Например, обоснованный выбор норм допустимых дефектов при изготовлении и эксплуатации дорожной одежды позволяет своевременно выявлять в них опасные повреждения и предупреждать тем самым возможность возникновения аварийных ситуаций. Кроме того, более полно использовать ресурс дорожной одежды путем регламентированной их эксплуатации на стадии устойчивого роста усталостных трещин.

Л и т е р а т у р а

1. Романив О.Н., Ярема С.Я., Никифорчин и др. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, т. IV. 1990. – 680с.
2. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Киев.: Наук. думка. 1991. – 416с.
3. Paris P.C., Gomez M.P., Anderson W.E. A rational analytic theory of fatigue // Trend Eng. Univ. Wash., 1961, v. 13, №1. p.9-14.
4. Endo K., Goto H. Initiation and propagation of fretting fatigue cracks // Wear, 1976, v. 38. p. 311-324.
5. Гасанов Ш.Г. Трещина в сечении дорожного покрытия // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008, №1, с. 39 – 45.
6. Гасанов Ш.Г. Расчет параметров разрушения дорожного покрытия при наличии малых трещин // Научные труды Азерб. гос. Авиационной академии, 2007, с. 27 – 39.
7. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
8. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. – М.: Наука, 1989. – 224 с.
9. Nix K.J., Lindley T.C. The application of fracture mechanics to fretting fatigue // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 1985, v.8, №2. p. 143-160.

CALCULATED METHOD OF RESEARCH OF FATIGUE FRACTURE OF THE ROAD COVERING

Hasanov Sh.H.

The calculated technique of an estimation of fatigue durability of road covering while in service is developed.

KEY WORDS: road covering, fatigue strength, fatigue crack, solid body destruction, cyclic loading, destruction criterions.

