

АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ПИТУХИН

доктор технических наук, профессор, декан лесоинженерного факультета, заведующий кафедрой технологии металлов и ремонта, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*pitukhin@psu.karelia.ru*

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ ПЕТРОВ

кандидат технических наук, преподаватель кафедры промышленного транспорта и геодезии лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*sssn20088@yandex.ru*

АРТЕМ ВАЛЕРЬЕВИЧ СТЕПАНОВ

аспирант кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*jals@onego.ru*

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРЕДЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ С ПОЗИЦИИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ\*

Рассматривается метод оценки вероятности безотказной работы дорожных покрытий лесовозных автомобильных дорог вследствие появления трещины предельных размеров при однократном приложении нагрузки. В основу положены известные методы механики разрушения, применяющиеся ранее авторами для оценки надежности металлоконструкций. В отличие от классического подхода здесь предусмотрено вычисление не конкретной составляющей тензора направлений, а интенсивности действующих напряжений в целом. Вероятность безотказной работы определена аналитическим методом для любого заданного закона распределения. Рассмотрены и частные случаи для закона нормального распределения Гаусса и двухпараметрического распределения Вейбулла. Представленные в статье результаты получены для статического нагружения. Предложенный вероятностный подход может быть полностью применен и для случая динамического нагружения. При этом вместо критического коэффициента интенсивности напряжений в полученных зависимостях следует использовать критический коэффициент интенсивности напряжений при динамическом нагружении.

Ключевые слова: предельная нагрузка, однократное воздействие, вероятность безотказной работы

Для описания процесса разрушения лесовозных [2] автомобильных дорог могут быть использованы структурные либо полуэмпирические модели. Структурные модели основаны на математическом описании физики процесса накопления повреждений на одном либо нескольких уровнях структуры [6], [7]. Развитие процессов поврежденности зависит как от внутренних, так и от внешних причин. Разрушение дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог [1] в данном случае будем рассматривать вследствие появления трещины предельных размеров при однократном приложении нагрузки.

Раскрытие трещины в твердом теле может быть осуществлено одним из трех известных путей (рис. 1): при нормальных напряжениях возникает трещина типа «разрыв» (тип I), при плоском сдвиге образуется трещина типа «сдвиг» (тип II), при антиплоском – типа «рез» (тип III).

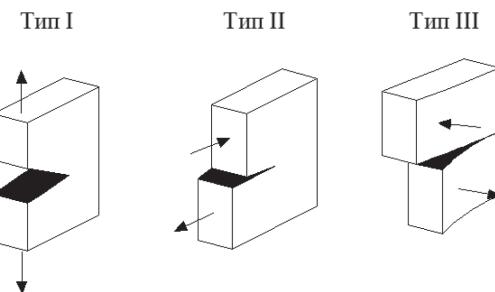


Рис. 1. Типы растрескивания

Примем допущение, что при взаимодействии колеса с поверхностью лесовозной дороги раскрытие трещины происходит по всем трем микромеханизмам в силу трехмерного напряженно-деформированного состояния [3]. Раскрытие трещины может происходить при однократном либо циклическом приложении нагрузки.

При однократном приложении постоянно возрастающей нагрузки (при движении транс-

портного средства с нагрузкой на ось выше критической) условия разрушения записываются в виде предельной поверхности:

$$\varphi(K_{\text{I}}, K_{\text{II}}, K_{\text{III}}) = 0. \quad (1)$$

Например,

$$\left(\frac{K_{\text{I}}}{K_{\text{IC}}}\right)^{m_1} + \left(\frac{K_{\text{II}}}{K_{\text{IIC}}}\right)^{m_2} + \left(\frac{K_{\text{III}}}{K_{\text{IIIIC}}}\right)^{m_3} = 1, \quad (2)$$

где  $m_1, m_2, m_3, K_{\text{IC}}, K_{\text{IIC}}, K_{\text{IIIIC}}$  – константы материала;  $K_{\text{I}}, K_{\text{II}}, K_{\text{III}}$  – коэффициент интенсивности напряжений по соответствующим типам растрескивания [4].

Или в частном случае:

$$\alpha_1 \frac{K_{\text{I}}}{K_{\text{IC}}} + \alpha_2 \frac{K_{\text{II}}}{K_{\text{IIC}}} + \alpha_3 \frac{K_{\text{III}}}{K_{\text{IIIIC}}} = 1, \quad (3)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1,$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – весовые коэффициенты.

При допущении, что раскрытие трещины осуществляется по трем механизмам, коэффициент интенсивности напряжений  $K_i$  может быть определен по формуле:

$$K_i = Y_i(l) \sigma_i \sqrt{\pi l}, \quad (4)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $Y_i(l)$  – коэффициент, учитывающий размеры покрытия и вид дефекта;  $l$  – длина трещины.

Условие разрушения в этом случае записется в виде:

$$K_i \geq K_{\text{IC}}. \quad (5)$$

Зная критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{\text{IC}}$ , можно определить вероятность безотказной работы  $P$  при предположении, что плотность распределения вязкости разрушения материала дорожной конструкции  $f_1(K_{\text{IC}})$  и коэффициента интенсивности напряжений  $f_2(K_i)$  известны. Кроме того, предположим их независимость. Тогда искомая функция определится уравнением:

$$P = \Pr\{K_{\text{IC}} - K_i \geq 0\}. \quad (6)$$

Вероятность того, что коэффициент интенсивности напряжений находится в интервале  $\left(K_i^0 - \frac{dK_i}{2}, K_i^0 + \frac{dK_i}{2}\right)$ , определяется известным равенством:

$$\Pr\left(K_i^0 - \frac{dK_i}{2} \leq K_i \leq K_i^0 + \frac{dK_i}{2}\right) = f_2(K_i^0) dK_i. \quad (7)$$

Вероятность того, что вязкость разрушения  $K_{\text{IC}}$  превышает некоторое значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_i^0$ , определится выражением:

$$P = \Pr\left(K_{\text{IC}} > K_i^0\right) = \int_{K_i^0}^{\infty} f_1(K_{\text{IC}}) dK_{\text{IC}}. \quad (8)$$

Вероятность того, что значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_i$  заключено в малом интервале  $dK_i$ , а вязкость разрушения  $K_{\text{IC}}$  превышает коэффициент интенсивности напряжений, задаваемый этим интервалом, имеет вид:

$$f_2(K_i^0) dK_i \int_{K_i^0}^{\infty} f_1(K_{\text{IC}}) dK_{\text{IC}}. \quad (9)$$

Таким образом, зависимость для оценки вероятности безотказной работы при однократном нагружении путем интегрирования по вязкости разрушения запишется:

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(K_{\text{IC}}) \left[ \int_{-\infty}^{K_{\text{IC}}} f_2(K_i) dK_i \right] dK_{\text{IC}}. \quad (10)$$

В случае, когда величины  $K_i$  и  $K_{\text{IC}}$  распределены по нормальному закону, с математическими ожиданиями  $K_i, K_{\text{IC}}$  и дисперсиями  $D_{K_i}, D_{K_{\text{IC}}}$ , вероятность безотказной работы  $P$  может быть определена по формуле:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

$$z = -\frac{\bar{K}_{\text{IC}} - \bar{K}_i}{\sqrt{D_{K_{\text{IC}}} + D_{K_i}}}. \quad (11)$$

Если величины  $K_i$  и  $K_{\text{IC}}$  имеют двухпараметрическое распределение Вейбулла, вероятность безотказной работы определяется формулой:

$$P = 1 - \int_0^{\infty} \left( \frac{x}{\theta_i} \right)^{\alpha_i} \frac{\alpha_i}{x} \exp \left[ -\left( \frac{x}{\theta_{\text{IC}}} \right)^{\alpha_{\text{IC}}} - \left( \frac{x}{\theta_i} \right)^{\alpha_i} \right] dx, \quad (12)$$

где  $\alpha_i, \theta_i$  – соответственно параметры формы и масштаба в распределении коэффициента интенсивности напряжений;  $\alpha_{\text{IC}}, \theta_{\text{IC}}$  – соответственно параметры формы и масштаба в распределении вязкости разрушения.

Представленные выводы верны для статического нагружения. Критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{\text{IC}}$  определяется экспериментально при статическом нагружении. На практике имеет большое значение и ударное нагружение. Так, при движении лесовозных автомобилей по дороге, при проезде автомобиля через выступ неровности возникает динамический удар на покрытие на некотором расстоянии за ним, в результате чего нагрузка на покрытие значительно увеличивается. В случае динамического нагружения вычисляется динамический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{\text{IDC}}$ , который сравнивается с критическим значением  $K_{\text{IC}}$ . Параметр  $K_{\text{IDC}}$  является характеристикой материала, определяется экспериментально и зависит от скорости нагружения. Вероятностный подход, изложенный выше, может быть полностью применен и для случая динамического нагружения [5].

\* Работа выполнена при поддержке международного проекта «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике» ППС ЕИСП «Карелия» в рамках реализации Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бурмистрова О. Н. Повышение надежности и эффективности лесовозных автомобильных дорог в условиях Северо-Запада: Дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2006. 392 с.
- Петров А. Н., Степанов А. В. Оценка качества содержания лесовозных автомобильных дорог // Повышение эффективности лесного комплекса Республики Карелия: Материалы третьей республиканской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, докторантов. Петрозаводск, 2012. С. 33–35.
- Питухин А. В., Петров А. Н. Влияние ровности покрытий на работоспособность автомобильных дорог // Транспортное дело России. 2010. № 5 (78). С. 71–75.
- Питухин А. В. Вероятностно-статистические методы механики разрушения и теории катастроф в инженерном проектировании. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 304 с.
- Питухин А. В., Петров А. Н., Марков В. И., Степанов А. В. Метод определения вероятности безотказной работы участка лесовозной автомобильной дороги вследствие усталостного изнашивания дорожного покрытия // Транспортное дело России. 2013. № 2 (105). С. 15–18.
- Pitukhin A. V. Optimal design problems using fracture mechanics methods // Computers and structures. 1997. № 4 (65). P. 621–624.
- Pitukhin A. V. Fracture mechanics and optimal design // International journal for numerical methods in engineering. 1992. № 3 (34). P. 933–940.

Pitukhin A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Petrov A. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Stepanov A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

#### ESTIMATION OF ROAD COATING RELIABILITY UNDER LIMITED LOADS CALCULATED BY MEANS OF FRACTURE MECHANICS METHOD

The article considers a method evaluating reliability of the logging road coverings in consequence of the extreme size cracks' occurrences under single load application. The well-known methods of fracture mechanics are used. The authors of the article used this method earlier to assess reliability of steel structures. In contrast to the classical approach, the calculation of a particular component of the tensor directions is not considered, instead the intensity of the existing stresses as a whole is calculated. The probability of a non-failure work is defined by the analytical method for any given distribution law. Some special cases for the Gauss law of normal distribution and two-parametrical Weibull distribution are considered. The results presented in the article were obtained for static loading. The probability approach proposed in the article can be fully applied to the case of dynamic loading. Though it should be noted that instead of the critical stress intensity factor in the obtained dependencies the critical stress intensity factor under dynamic loading should be used.

Key words: limiting loads, single exposure, reliability function

#### REFERENCES

- Burmistrova O. N. *Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti lesovoznykh avtomobil'nykh dorog v usloviyakh Severo-Zapada*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Increase of reliability and efficiency of logging roads in the North-West. Dr. tech. sci. diss.]. Voronezh, 2006. 392 p.
- Petrov A. N., Stepanov A. V. Quality estimation of the logging roads' maintenance [Otsenka kachestva soderzhaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog]. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa Respubliki Kareliya: Materialy tret'ey respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, doktorantov* [Increase of the forest complex efficiency in the Republic of Karelia: Materials the third Republican scientific conference of young scientists, postgraduates, doctoral students]. Petrozavodsk, 2012. P. 33–35.
- Pitukhin A. V., Petrov A. N. The influence of the coatings' flatness on the performance of roads [Vliyanie rovnosti pokrytiy na rabotosposobnost' avtomobil'nykh dorog]. *Transportnoe delo Rossii* [Russian carrying trade]. 2010. № 5 (78). P. 71–75.
- Pitukhin A. V. *Veroyatnostno-statisticheskie metody mekhaniki razrusheniya i teorii katastrof v inzhenernom proektirovaniy* [Probabilistic-statistical methods of fracture mechanics and the theory of catastrophes in engineering design]. Petrozavodsk, Izd-vo PetrSU, 1998. 304 p.
- Pitukhin A. V., Petrov A. N., Markov V. I., Stepanov A. V. Reliability function estimation method of the timber road section due to road coating fatigue wear [Metod opredeleniya veroyatnosti bezotkaznoy raboty uchastka lesovoznoy avtomobil'noy dorogi vsledstvie ustalostnogo iznashivaniya dorozhnogo pokrytiya]. *Transportnoe delo Rossii* [Russian carrying trade]. 2013. № 2 (105). P. 15–18.
- Pitukhin A. V. Optimal design problems using fracture mechanics methods // Computers and structures. 1997. № 4 (65). P. 621–624.
- Pitukhin A. V. Fracture mechanics and optimal design // International journal for numerical methods in engineering. 1992. № 3 (34). P. 933–940.