

УДК 334.01; 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Смогунов Владимир Васильевич,

Пензенский государственный университет, г.Пенза,

доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Вдовикина Ольга Анатольевна,

Пензенский государственный университет, г.Пенза,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Кузнецов Никита Сергеевич,

лингвистическая гимназии №6, г.Пенза,

гимназист.

Кочетков Денис Викторович,

Пензенский государственный университет, г.Пенза,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Шорин Владимир Алексеевич,

Пензенский государственный университет, г.Пенза,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Пшеничный Олег Федорович,

Пензенский государственный университет, г.Пенза,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Волчихина Нина Ивановна,

Пензенский государственный университет, г.Пенза,

доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Аннотация

Статья содержит анализ предвестников разрушения автомобильных дорог: неровностей, пористости, разноплотности, колеяности. Установлены четыре закономерности разрушения дорог – температурное, влажностное, термоциклическое, волновое. Созданы обобщенная модель многослойных гетероструктур автодорог, модели трещинообразования, модели накопления повреждений.

Ключевые слова: модели, предикторы, закономерности, разрушение, автодороги.

SIMULATION OF DESTRUCTION OF HIGHWAYS

Smogunov Vladimir Vasilevich,

Penza State University, Penza,

Doctor of Sciences, Professor of the department “Theoretical and applied mechanics and graphics”.

Vdovikina Olga Anatolevna,

Penza State University, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Theoretical and applied mechanics and graphics”.

Kuznetsov Nikita Sergeyevich,

*Linguistic Gymnasia №6, Penza,
schoolboy.*

Kochetkov Denis Viktorovich,

Penza State University, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Theoretical and applied mechanics and graphics”.

Shorin Vladimir Alekseevich,

Penza State University, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Theoretical and applied mechanics and graphics”.

Pshenichny Oleg Fedorovich,

Penza State University, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Theoretical and applied mechanics and graphics”.

Volchikhina Nina Ivanovna,

Penza State University, Penza,

Associate Professor of the department “Theoretical and applied mechanics and graphics”.

Abstract

The article analyzes harbingers of destruction of roads: roughness, porosity, density differences, rut. There are four patterns of damage to roads – temperature, humidity, temperature cycling, the wave. Create a generalized model of multilayer heterostructures roads, crack model, the model of damage accumulation.

Keywords: model, predictors, patterns, destruction, highway.

В октябре 2014г. на Президиуме Государственного Совета В.В. Путин выделил главные проблемы дорожного хозяйства России. Среди них – недостаточный ресурс дорог и значительное удорожание инертных материалов – песка и щебня.

Нашими исследованиями установлены основные предикторы, закономерности и модели разрушения автомобильных дорог. Предикторами разрушения автомобильных дорог являются неровности, разноплотность, пористость, колейность.

Модели разрушения дорог: грунтовых – переувлажнения, колейность; щебенчатых и миксов – просадки; бетонных – трещины, шелушение; плитных – коробление, выщерблины; асфальтовых – трещины, просадки.

Установлены системные связи предикторов с деградацией полотна, а также закономерности разрушения наиболее распространенных асфальтовых дорог. Неровности, разноплотность, пористость, колейность при воздействии климатических факторов и динамических нагрузений от движущегося транспорта с неизбежностью приводят к трещинообразованию в поверхностном слое асфальтобетона с прорастанием микротрещин до слоев щебня и песка. На рисунке 1 представлена обобщенная графическая модель микротрещинообразования на поверхности щебеночно-мастичного асфальтобетона.

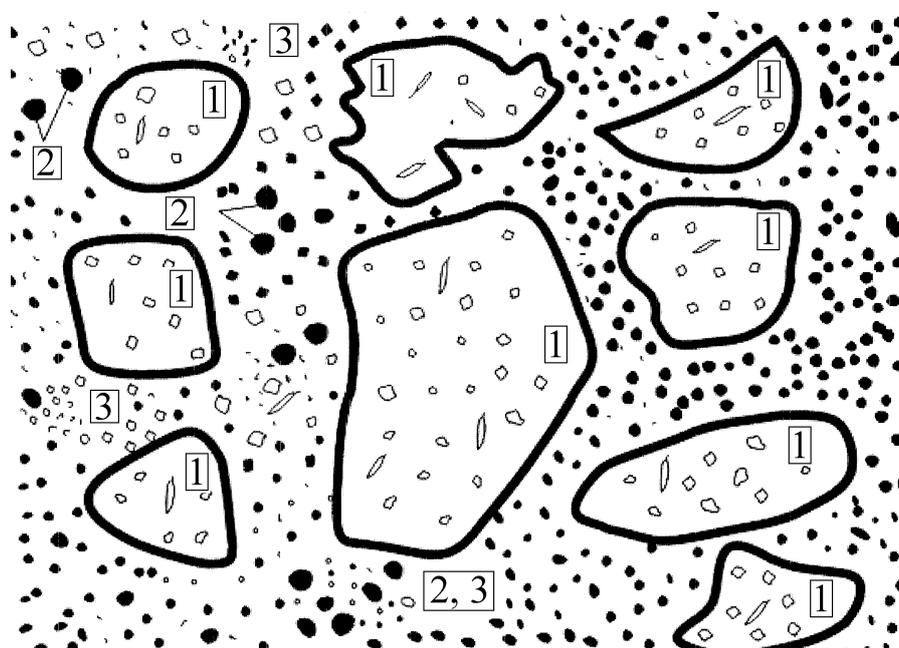


Рисунок 1 – Обобщенная графическая модель микротрещинообразования:

1 – щебень, 2 – песок, 3 – минеральный порошок

Микронесплошности определялись с использованием методики флуоресцентной наноскопии на цифровом нановизоре, обеспечивающим разрешение менее 100 нм.

Методика строилась на основе использования цифровых микроскопов BRESSER с увеличением до $\times 350$ и Levenhuk D320L с увеличением до $\times 1200$. Для обеспечения определения наноразмерных субмикронесплошностей в

монолитах флуоресцентный нановизор с разрешением до 100 нм – аналог флуоресцентных микроскопов для живых клеток, получивших Нобелевскую премию по химии в 2014г.

Интеллектуальный анализ данных о разрушении автомобильных дорог позволил выявить четыре закономерности разрушения дорог.

1. Температурное разрушение описывает трещинообразование в асфальтобетоне, лежащем на щебне, при взаимодействии отрицательных температур, вызывающих охрупчивание битума и наноразрушение по границам гетероструктур.

2. Влажностное разрушение с потерей устойчивости земляного полотна при переувлажнении щебня, песка, грунта приводящее к просадкам и трещинам в асфальтобетоне.

3. Термоциклическое разрушение, с переходами температуры через ноль градусов, описывает разрушение асфальтобетона и подстилающих слоев щебня и песка при замораживании и размораживании воды в поверхностных субмикротрещинах в асфальтобетоне, а также при просачивании воды в щебень и песок с образованием линз.

4. Волновое разрушение многослойной гетероструктуры дороги под действием волновых полей, возникающих при движении автотранспорта, приводящих к переупаковке щебня и песка, возникновению просадок полотна и трещинам в асфальтобетоне.

Основной причиной недостаточного ресурса дорог является разрушение асфальтобетона под действием волновых полей при переупаковке щебня и песка. В связи с этим были предложены твердотельные дороги, в которых нет несвязанных инертных материалов типа щебня и песка.

Второй по важности причиной быстрого разрушения дорог является недостаточные для основных климатических зон, эксплуатационные характеристики асфальтобетона и недостаточно устойчивая к нарушениям

технологии укладки и уплотнения асфальтобетона. Особенно важно это для современных интенсивных потоков тяжелого, до 15 т/ось, транспорта.

Таким образом, причинами разрушения дорог являются: трещинообразование в асфальте из-за термонапряжений; рост поверхностных трещин при замерзании воды; сквозные трещины; волновые поля; переупаковка щебня и песка; «ямочные» нарушения поверхности дорог, множественные трещины и выбоины в дорожном полотне вследствие несвязанности щебня и песка в подстилающих слоях; характеристики асфальтобетона и недостаточно устойчивая к нарушениям технология укладки и уплотнения асфальтобетона. Особенно важно это для современных интенсивных потоков тяжелого до 15 т/ось транспорта.

Создана обобщенная модель многослойных структур автодорог.

Динамика многослойной гетерогенной структуры с существенной неоднородностью слоев, лежащей на упруго-пластическом основании, позволяющая определять перемещения и напряжения в слоях, описывается системой дифференциальных уравнений волнового вида

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{i-1} \frac{a\rho_1 H_i}{6} + \ddot{z}_i \left(\rho h + \rho_1 \frac{H_{i-1}}{3} + \rho_1 \frac{H_i}{3} \right) + \ddot{z}_{i+1} \frac{a\rho_1 H_{i+1}}{6} + z_i \frac{D\pi^4}{2a^3} + \\ + \int_0^a dx \left\{ \int_0^{H_i} \left(\frac{\sigma_{yy}^{(i)}}{H_i} \sin \frac{\pi x}{a} + \sigma_{xy}^{(i)} \frac{\pi}{a} \cos \frac{\pi x}{a} \frac{y}{H_i} \right) dy + \right. \\ \left. + \int_0^{H_{i+1}} \left(-\frac{\sigma_{yy}^{(i+1)}}{H_{i+1}} \sin \frac{\pi x}{a} + \sigma_{xy}^{(i+1)} \frac{\pi}{a} \cos \frac{\pi x}{a} \left(1 - \frac{y}{H_{i+1}} \right) \right) dy \right\} + \\ + F \frac{2a}{\pi} \left(\rho h + \rho_1 \frac{H_i}{2} + \rho_1 \frac{H_{i+1}}{2} \right) = 0; \quad i = 2, \dots, N-1, \end{aligned}$$

где a – ширина структуры, N – количество слоев, ρ , ρ_1 – объемная плотность материала слоев, h , H – толщина слоев, F – перегрузка, σ – напряжения в слоях, z – вертикальные перемещения в слоях.

Модель позволяет проведение вычислительных экспериментов с целью определения максимальных значений вертикальных перемещений и

напряжений в слоях при воздействии импульсных нагрузок произвольной длительности и интенсивности. В результате анализа результатов определяется превышение допустимых значений напряжений, приводящих к потере прочности. Таким образом, моделируются условия возникновения дефектов на микроуровне [1].

Известно, что основную опасность представляют резонансные режимы, приводящие к возрастанию амплитуд колебаний при совпадении частот. Однако, возможны проявления характерных признаков резонанса и при кратных частотах. Причем низкочастотные внешние возмущения могут оказаться не менее опасными, чем высокочастотные, так как при недостаточных диссипативных свойствах система успевает полностью отрелаксировать и произвести циклы колебаний с максимальной амплитудой. При высокочастотных внешних возмущениях полной релаксации не происходит, однако в системе возникают недопустимые перегрузки, так как она находится под воздействием знакопеременного цикла напряжений.

Дана модель особенности напряжений на краях гетерогенных структур.

Наиболее распространенной теорией, описывающей разрушение упругих тел, является теория Гриффитса–Орована–Ирвина, которая формулирует внутренний механизм разрушения и дает математическую модель на основе физических параметров. Явление усталости рассматривается как процесс постепенного разрушения асфальтобетона трещинами, в котором выделяются три фазы: начало образования трещин; период стабильного роста трещины; стадия нестабильного (интенсивного) роста трещины [2, 3].

Фаза начала образования трещин проявляется при первых циклах усталости. Величина трещин – от наноразмеров до величин, меньших 1...2 мм. Фаза стабильного роста трещин – основной процесс разрушения. Циклическое повторение нагрузки ведет к постепенному росту трещин до критической глубины. В фазе нестабильного роста трещина увеличивается самопроизвольно, что и ведет к разрушению материала. Фаза стабильного роста в механике

разрушения описывается законом роста трещин: $\frac{da}{dN} = AK^n$, где a – глубина трещины; N – число циклов нагрузки; A – константы материала; K – фактор интенсивности напряжения; n – константы механики разрушения.

Значения коэффициентов A и n определяются экспериментально. При условии, что большая часть процесса усталости характеризуется устойчивым ростом трещины от исходной величины a_0 до критической глубины a_f , усталостную долговечность материала описывается уравнением $N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{AK^n} da$.

Фактор интенсивности напряжений K является одним из наиболее объективных параметров, позволяющих использовать закономерности механики разрушения для количественной оценки процесса усталостного разрушения.

На основании теоретического анализа определен закон докритического развития трещины в упругопластической матрице до точки полной неустойчивости

$$\frac{da}{dN} = \frac{\pi}{24} K_{1c}^2 \sigma_y^2 [(\Delta K_1)^4 - K_0^4],$$

где a – длина трещины; K_{1c} – критическое значение фактора интенсивности напряжения; K_1 – физическое значение фактора интенсивности напряжения; K_0 – предел усталости или нижнее значение фактора интенсивности напряжения, ниже которого трещины не распространяются; σ_y – предел прочности на растяжение при изгибе.

Значения K_{1c} , σ_y , A могут быть найдены экспериментально, что позволит рассчитывать число циклов до разрушения и сравнивать полученные данные с расчетами долговечности. При этом устанавливается вполне удовлетворительная сходимость. Ожидается, что результаты исследований в случае их подтверждения дальнейшими экспериментами позволят значительно упростить процесс проектирования дорожных одежд с учетом усталостных явлений.

Наиболее опасными точками являются точки сопряжения разномодульных материалов и границ гетерогенных структур. На границах соединений разнородных материалов в угловых точках имеется концентрация напряжений, проявляющаяся при любых нагрузках – как температурных, так и динамических.

Напряженное состояние в окрестности угловой точки определяется коэффициентом интенсивности напряжений A и минимальным собственным значением некоторой спектральной задачи α (определяемым из решения однородной задачи о клине). При $\text{Re}\alpha > 1$ напряжения в угловой точке конечны и равны нулю, при $\text{Re}\alpha < 1$ – бесконечны. В пограничном случае ($\text{Re}\alpha = 1$) в особой точке поверхности напряжения имеют конечное ненулевое значение, определяемое коэффициентом интенсивности напряжений A .

Согласно теории Гриффитса–Орована–Ирвина, в вершине трещины имеет место напряженное состояние, описываемое вектором перемещений \vec{U} в полярных координатах $\vec{U}(r, \varphi) = A \cdot r^\alpha \cdot \vec{\eta}(\varphi)$, где $\vec{\eta}(\varphi)$ – собственная функция некоторой задачи Штурма–Лиувилля, $\alpha = 0,5$.

Разрушение тела происходит при достижении коэффициентом интенсивности напряжений критического значения $A_{\text{кр}}$, являющегося константой материала. Таким образом? моделируется зарождение трещин и моделируются условия возникновения дефектов на наноуровне.

Многokратное интенсивное нагружение приводит к накоплению усталостных повреждений.

Модель накопления усталостных повреждений построена следующим образом. Усталостные повреждения, вызываемые различными по величине напряжениями, суммируются, усталостное разрушение наступает тогда, когда сумма относительных повреждений по всем уровням амплитуд напряжений достигает единицы

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N(\sigma_i)},$$

где D – доля накопленных повреждений; T – общее количество периодов, в течение которых производится расчет; n_t – фактическое количество приложений нагрузок в течение периода t ; $N(\sigma_t)$ – допустимое количество приложений нагрузок при напряжениях цикла σ_t .

Допустимое количество приложений нагрузок при различных условиях нагружения асфальтобетонного слоя рассчитывается по формуле

$$N(\sigma_t) = \left(\frac{R_{\text{изг}}}{\sigma_t} \right)^n,$$

где $R_{\text{изг}}$ – прочность асфальтобетона на растяжение при изгибе, МПа; σ_t – растягивающие напряжения, МПа; n – показатель усталости.

Расчет максимальных растягивающих напряжений на нижней границе асфальтобетонного покрытия при проезде осей транспортных средств (σ_j^k) выполняется с использованием моделей деформирования дорожной конструкции. Для рассчитанных значений растягивающих напряжений определяется допустимое количество приложений нагрузок при заданном режиме нагружения $N(\sigma_j^k)$ и единичное усталостное повреждение, возникающее в асфальтобетонном покрытии при действии осевой нагрузки. Суммирование единичных повреждений всех осей автомобиля позволяет оценить долю повреждений при проезде транспортного средства заданной группы D_k :

$$D_k = \sum_{j=1}^m \frac{1}{N(\sigma_j^k)},$$

где j – номер оси автомобиля; k – количество осей автомобиля.

Доля усталостных повреждений, возникающих при действии всех групп автомобилей транспортного потока в указанный временной промежуток, составляет: $D_t = \sum_{k=1}^g n_k \cdot D_k$, где n_k – количество проездов автомобилей k -го типа за период t ; g – количество типов автомобилей в транспортном потоке.

Количество проездов автомобилей k -го типа определяют по формуле:

$$n_k = 0,7 \cdot N_k^t \cdot T_{\text{дн}} \cdot f_{\text{пол}} \cdot K_n,$$

где N_k^t – суточная интенсивность движения автомобилей k -го типа, авт/сут; $T_{\text{дн}}$ – число дней анализируемого периода; $f_{\text{пол}}$ – коэффициент, учитывающий распределение движения по полосам; K_n – коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого.

Выводы

1. Таким образом, общей закономерностью разрушения всех типов автомобильных дорог является закономерность вариабильности 3D гетероструктуры не связанных частиц песка и щебня. Данная закономерность объясняет причины локальных просадок, колеяности и развития микротрещин.

2. Определены предикторы и закономерности разрушения автомобильных дорог. Создана новая теория и модели разрушения автодорог. Показана основная причина низкого ресурса – несвязанность щебня и песка в подстилающих слоях, которая приводит к просадкам, колеяности и трещинам в асфальтобетоне.

Библиографический список:

1. Тайцай А.И., Шорин В.А., Тайцай Ю.В.. Моделирование поведения образцов асфальтобетона при нагружениях // Молодежь и наука: Модернизация и инновационное развитие страны : Сборник материалов международной научно-практической конференции. 2013. С. 100-104.

2. Vladimir Shorin, Oleg Pshenichni, Viktor Senkin. The heterostructure destruction. LAMBERT Academic Publishing, 2013. 44 p.

3. Смогунов В.В., Шорин В.А., Ардеев А.Ю. Модели нанокатастроф гетероструктур // Модели, системы, сети в экономике технике, природе и обществе. 2013. №4(8). С. 191-196.