© К.В. Ардеев, В.В. Иванов,
В.А. Хямяляйнен, 2006

УДК 622.831.32

К.В. Ардеев, В.В. Иванов, В.А. Хямяляйнен

МОНИТОРИНГ ЖЕСТКИХ ПОКРЫТИЙ КАРЬЕРНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ВЫЗВАННОГО ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТА

Семинар № 3

Рост добычи полезных ископаемых открытым способом неразрывно связан с совершенствованием и эффективностью работы карьерного автотранспорта. 40-70 % трудоёмкости, энергоёмкости и себестоимости добычи полезных ископаемых приходится на перемещение горной массы. При этом эффективность работы карьерного автотранспорта непосредственно зависит от качества и работоспособности подъездных дорог и их основного элемента - дорожной одежды [1].

Возрастающим требованиям, как показывает отечественный и мировой опыт, в наибольшей степени отвечают цементобетонные покрытия. Их преимуществами являются стабильные транспортно-эксплуатационные показатели и высокая долговечность [2].

Автомобильные дороги с цементобетонными покрытиями в России были построены на ряде горнодобывающих предприятий, но, несмотря на все свои преимущества встречаются довольно редко. Это во многом связано с их низкой работоспособностью, обусловленной несвоевременным ремонтом дорог, сложными природно-климатическими факторами и высокими нагрузками, воздействующими на дорожное покрытие.

Главная цель мониторинга карьерных дорог - повышение эффективности работы карьерного автотранспорта путем своевременного выявления скрытых дефектов структуры жестких покрытий карьерных дорог.

В связи с особенностями работы карьерных дорог, определяющим показателем срока службы жестких покрытий является их прочность, снижающаяся со временем в связи с накопления микродефектов. Очевидно, что наиболее перспективные методы мониторинга жестких покрытий карьерных дорог должны не только оценивать текущее состояние дорожного покрытия, но и с достаточной точностью предсказывать ресурс его работоспособности.

Разработка практических методов прогноза работоспособности карьерных дорожных покрытий, связана с проведением теоретических и экспериментальных исследований в ряде фундаментальных и прикладных областей науки, таких как механика раз-рушения, механика дорожных покрытий, теория автомобиля, надежность строительных конструкций и др. Наиболее сложным является выполнение экспериментальных исследований, в процессе которых необходимо наблюдать многолетние длительно протекающие процессы изменения основных эксплуатационных показателей дорожных покрытий в результате совместного влияния большого числа факторов, имеющих выраженную вероятностную природу. Прогнозирование

срока службы дорожных покрытий, требует знания усталостной прочности материалов. Как правило, её оценка возможна либо путем долговременных испытаний образцов при постоянной нагрузке, либо при циклических нагрузках. Однако в обоих случаях испытания носят долговременный и весьма трудоёмкий характер, а прогноз усталостной прочности возможен лишь при накоплении большого объёма статистических данных. Кроме того, связь усталостной прочности с числом проездов автотранспортных средств не всегда выражается простыми корреляционными уравнениями, что обусловлено зависимостью усталостной прочности от асимметрии прикладываемой нагрузки, характера зависимости напряжений от времени, изменений температуры в процессе нагружения покрытия и другими факторами. Значительные напряжения в материале дорожных покрытий обусловлены изменением температуры. Как следует из многочисленных многолетних наблюдений, разрушение наступает от возникающих микронапряжений вследствие расширения воды в микротрещинах и порах при застывании. Методы определения морозостойкости материала покрытия карьерных дорог, регламентированные действующими нормативными документами, весьма трудоемки (даже в ускоренных вариантах). Как правило, они основаны на прямом или косвенном определении потери прочности материала при многократном замораживании и оттаивании образцов.

Вследствие этого для мониторинга жестких покрытий весьма перспективно применение геофизических методов, которые основаны на использовании предвестников разрушения - аномалий или возмущений физических параметров материалов, которые сопровождают процесс формирования очага разрушения. Наибольший интерес представляют методы, основанные на регистрации электромагнитной эмиссии при быстром распространении трещин. В наиболее развитых кинетических моделях выделения импульсов ЭМИ в комплексе учитываются как масштаб разрушения, изменение напряжений, так и изменение температуры (В.В. Иванов и др.).

Основными физическими механизмами, вносящими определяющий вклад в величину электрического заряда и дипольного момента вблизи вершины быстро распространяющихся трещин, является пьезоэффект, поперечное скольжение заряженных дислокаций и адгезия вблизи поверхности контакта зерен и цементирующего вещества [3].

Количественная оценка заряда и дипольного момента на единицу длины фронта трещины для разных материалов даёт заряд $Q_{//} \sim 10^{-11} \div 10^{-12}$ Кл/м; дипольный момент $P \sim 10^{-15} \div 10^{-16}$ Кл·м/м; и поверхностную плотность заряда $\delta_0 \sim 10^{-2} \div 10^{-5}$ Кл/м^2. В результате в процессе нагружения материалов возникают импульсы ЭМИ, частота образования которых определяется следующей формулой

$$\omega_1 = \frac{2\pi C^*}{\tau_0} \exp\left[\frac{\gamma\sigma - U_0}{kT}\right] \qquad (1)$$

где C^* – предельная концентрация трещин, м$^{-3}$; τ_0 – период тепловых атомных колебаний, с; U_0 – энергия активации разрушения материала, Дж; γ – активационный объём, м^3; k – постоянная Больцмана, Дж/град; T – абсолютная температура, К^o; σ – действующие в материале напряжения, Па.

Разработанная нами кинетическая модель выделения импульсов ЭМИ для сложных неизотермических условий нагружения имеет следующий вид:

$$\dot{N}(t) = \frac{N^*}{\tau_0 \cdot L_c} \exp\left[\frac{(\gamma \cdot \sigma(t) - U_0)}{k \cdot T(t)}\right], \qquad (2)$$

$$\frac{(N^* / V)^{-1/3}}{l} \cong e, \qquad (3)$$

$$\int_0^{\tau} \frac{N^*}{\tau_0 \cdot L_c} \exp\left[\frac{(\gamma \cdot \sigma(t) - U_0)}{k \cdot T}\right] dt = N^*, \qquad (4)$$

где V – объем очага разрушения, м^3; L_c – масштабный коэффициент; l – размеры микротрещин, м; N* – критическое число импульсов ЭМИ в объёме очага разрушения; τ – время до разрушения образца, с; e – основание натурального логарифма.

Первое уравнение (2) представляет собой скорректированное кинетическое уравнение С.Н. Журкова для скорости трещинообразования, уравнение (3) есть концентрационный критерий разрушения, а уравнение (4)- условие необратимости накопления повреждений структуры материала. Отличием данной модели от предшествующих является учет масштаба разрушения, а также изменений температуры и действующих нагрузок.

Кинетическая модель (2-4) нечувствительна к масштабному уровню разрушения, учитывает подобие процессов разрушения на разных уровнях, а кинетические константы U_0 и γ, найденные на испытываемых образцах, могут быть использованы в аналогичных условиях нагружения (объемное, одноосное сжатие - растяжение) для прогноза разрушения на любом уровне.

Предположив, что циклическое нагружение осуществляется путем приложения сжимающего или растягивающего напряжения с постоянной частотой и считая, что скорость изменения напряжений постоянна в каждом цикле $(\dot{\sigma} = const)$, для числа накопленных в каждом цикле импульсов ЭМИ можно получить:

$$N_1 = \frac{k \cdot T \cdot N^*}{\tau_0 \cdot L_c \cdot \gamma \cdot \dot{\sigma}} \exp\left(-\frac{U_0}{k \cdot T}\right) \times$$

$$\times \left[\exp\left(\frac{\gamma \cdot \dot{\sigma} \cdot t}{k \cdot T}\right) - 1\right], \qquad (5)$$

где t – время эксперимента; $\dot{\sigma}$- скорость нагружения; T – температура образца покрытия.

Учитывая что $n_ц \cdot N_l = N^*$, где $n_ц$ – число циклов до полного разрушения образца покрытия, можно найти кинетические константы разрушения из условия минимума суммы квадратов отклонений теоретических значений, от экспериментальных точек N_k кинетической кривой накопления импульсов ЭМИ:

$$\sum_{K=1}^{n} \left\{ N_K - \frac{k \cdot T \cdot N^*}{\tau_0 \cdot \gamma \cdot \dot{\sigma}} \exp\left(-\frac{U_0}{k \cdot T}\right) \times \right.$$

$$\left. \times \left[\exp\left(\frac{\gamma \cdot \dot{\sigma} \cdot t_K}{k \cdot T}\right) - 1\right] \right\}^2 \to \min_{U_0, \gamma}. \qquad (6)$$

Определив значения U_0 и γ можно спрогнозировать количество циклов приложения нагрузки до разрушения жесткого дорожного покрытия – $n_ц$:

$$n_Ц = \frac{\tau_o \cdot \gamma \cdot \sigma_A \cdot f \cdot L_c}{k \cdot T} \exp\left(\frac{U_o}{k \cdot T}\right) /$$

$$/ \left[\exp\left(\frac{\gamma \cdot \sigma_A}{k \cdot T}\right) - 1\right], \qquad (7)$$

где σ_A – амплитудные значения напряжений в жестком дорожном покрытии, Па; f – частота приложения нагрузки (частота движения карьерного автотранспорта), Гц; L_c – масштабный коэффициент

Для вычисления морозостойкости материала жесткого покрытия, используем кинетическую модель (2-4). Потеря прочности образцов с энергией активации разрушения U_0 равна $\beta \cdot U_0$, где β =

0,95 что соответствует 5%-ной потере прочности (по основной методике ГОСТа). Вычитая из (7) число циклов до разрушения образца с энергией активации $\beta \cdot U_0$ и выполняя некоторые преобразования, получим морозостойкость материала (число циклов замораживания-оттаи-вания при котором прочность образца уменьшается на 5%):

$$M = \frac{\dfrac{\tau_0 \cdot f \cdot r\left(\gamma \cdot \sigma_A - 40^0 K \cdot \beta \cdot U_0 / T_0\right) L_c}{k \cdot T_0}}{\exp \dfrac{\left(\gamma \cdot \sigma_A - 40 \cdot \beta \cdot U_0 / T_0\right)}{k \cdot T_0} - 1} \times$$

$$\times \frac{\exp\left(\dfrac{\beta \cdot U_0}{k \cdot T_0}\right)}{\exp \dfrac{\left(\gamma \cdot \sigma_A - 40 \cdot \beta \cdot U_0 / T_0\right)}{k \cdot T_0} - 1}. \qquad (8)$$

где 40 ^{0}К - изменение температуры за один цикл замораживания-оттаивания по основной методике ГОСТа.

Знание γ и U_0 позволяет по формуле (8) предсказать морозостойкость материалов жестких дорожных покрытий. Однако расчёт затруднен, поскольку заранее неизвестны параметры амплитуда внутренних микронапряжений - σ_A и количество микроповреждений структуры образцов r, накопленных к моменту 5%-й потери их прочности.

Методика прогноза морозостойкости материалов жесткого дорожного покрытия состоит в циклических испытаниях образцов и определении кинетических констант разрушения. Параллельно проводятся измерения морозостойкости образцов того же материала в соответствии с ГОСТ 10060.0-95. Из сравнений теоретических значений морозостойкости с результатами эксперимента для каждой серии образцов методом наименьших квадратов находим параметры σ_A и r:

$$\sum_{i=1}^{n} \left\{ \frac{M_i - \dfrac{\tau_0 \cdot f \cdot r\left(\gamma_i \sigma_A - 40 \beta U_{0i} / T_0\right)}{kT_0} \cdot \exp\left(\dfrac{\beta U_{0i}}{kT_0}\right)}{\exp \dfrac{\left(\gamma_i \sigma_A - 40 \beta U_{0i} / T_0\right)}{kT_0} - 1} \right\}^2 \to \min_{\sigma_A, r} \qquad (9)$$

где M_i – морозостойкость образцов в i циклах замораживания-оттаивания, полученная путём лабораторных испытаний по ГОСТу.

Вычисляя производные по параметрам σ_A и r и приравнивая их к нулю, можно получить уравнения, из которых определяют эти параметры, характерные для каждого типа материала.

Для определения кинетических констант разрушения образцов жесткого покрытия была собрана лабораторная установка, принципиальная блок – схема которой представлена на рис. 1.

За время проведения исследований было изготовлено и испытано около 250 образцов покрытий дорожной одежды тринадцати серий.

Каждый из исследуемых образцов помещался в ячейку и нагружался с постоянной скоростью $\dot{\sigma}$ до напряжения $\sigma_A \approx 0.9 \cdot \sigma_P$, где σ_P - разрушающее для данного типа материала напряжение. Затем образец разгружался с той же скоростью до напряжения, равного нулю. В каждом цикле нагружения-разгрузки регистрировали число накопленных микроповреждений структуры материала N_i (N_i – число зарегистрированных к моменту времени t_i микроповреждений). Процесс циклического нагружения повторяли до разрушении образца, при этом регистрировалось полное число микроповреждений структуры образца за всё время испытаний N^* и число циклов нагружения-разгрузки. Регистрировалась также температура образца во время испытаний (T).

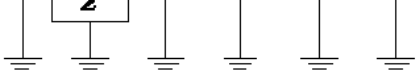

Рис. 1. Блок-схема лабораторной установки для изучения разрушения образцов методом ЭМИ: *1* – экранированная ячейка с образцом материала и датчиком электромагнитной эмиссии; *2* – нагружающее устройство; *3* – устройство для измерения температуры образца при разрушении; *4* – широкополосный усилитель; *5* – записывающий осциллограф; *6* – счетчик импульсов

По полученным данным с использованием модели (2-4) были найдены кинетические константы разрушения.

Был произведен расчёт количества циклов нагружения-разгрузки до разрушения для каждого образца и произведено сравнение с количеством циклов нагружения-разгрузки, выдержанных образцом в ходе лабораторных испытаний. В целом наблюдается хорошее соответствие циклической прочности материалов покрытия, определяемой экспериментально и прогнозируемой теоретически на основе найденных из эксперимента кинетических констант разрушения образцов.

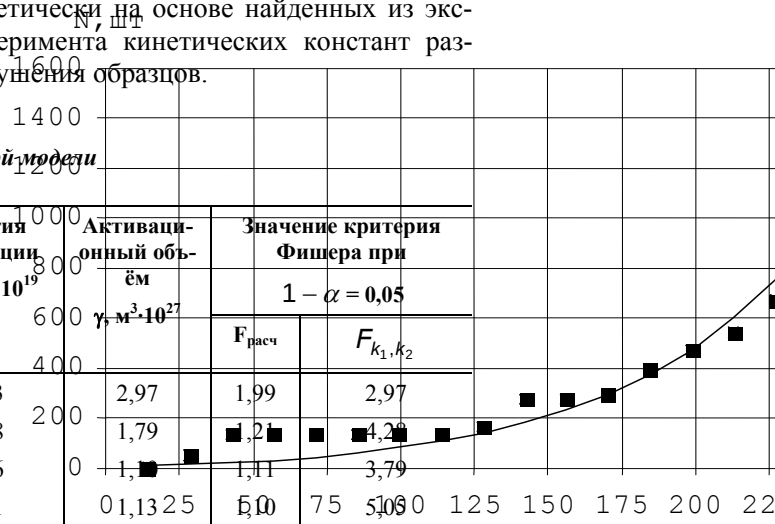

Таблица 1

Результаты проверки адекватности предложенной модели эксперименту по F-критерию Фишера

№ серии	Кол–во образцов *n*, шт	$S^2_{расч}$	$S^2_{эксп}$	Энергия активации U_0, Дж·10^{19}	Активационный объём γ, м^3·10^{27}	Значение критерия Фишера при $1-\alpha = 0{,}05$	
						$F_{расч}$	F_{k_1,k_2}
7	11	101,0	50,8	1,63	2,97	1,99	2,97
8	7	165,5	136,6	1,68	1,79	1,21	4,28
9	8	184,3	165,6	1,66	1,[illegible]	1,11	3,79
10	6	74,6	67,8	1,71	1,13	1,10	5,05
11	4	84,9	38,3	1,51	1,21	2,22	9,28
12	6	410,2	197,5	1,53	9,08	2,08	5,05
13	5	1368,8	1381,7	1,55	1,57	1,01	6,39
14	3	7004,7	954,3	1,50	6,70	7,34	19

где $S^2_{расч}$ - дисперсия количества циклов нагружения-разгрузки, полученных расчётным путём, $S^2_{эксп}$ - эмпирическая дисперсия количества циклов нагружения-разгрузки, полученных испытанием образцов, k_1 и k_2 – число степеней свободы соответственно большей и меньшей дисперсии.

$F_{расч} < F_{k_1,k_2}$, соответственно проверка гипотезы при 5%-ом уровне значимости свидетельствует о непротиворечивости выборочных данных.

Рис. 2. Кинетика накопления импульсов ЭМИ при одном цикле нагружения до полного разрушения образца покрытия: *N – число импульсов, шт; t – текущее время, с.; —— теоретическая кривая накопления микроповреждений; точки экспериментальной кривой.*

Сравнение экспериментальных значений морозостойкости с прогнозными, рассчитанными по формуле (7) показывает, что практически для всех исследованных типов материалов дорожного покрытия наблюдается весьма удовлетворительное соответствие теории и эксперимента (рис. 2).

Для подтверждения адекватности предложенной нами кинетической модели выделения импульсов ЭМИ при разрушении материалов покрытия карьерных дорог экспериментальным данным проводилась статистическая проверка гипотезы по F-критерию Фишера (см. табл. 1).

Обобщив результаты исследований, ожидаемую работоспособность покрытия дорожной одежды можно определить по формуле, получающейся из (7)

$$\int_0^{3{,}17\cdot 10^7 n_ц} \exp\left(\frac{\gamma\cdot(\sigma(t)+\sigma_A(t))-U_0}{k\cdot T(t)}\right)dt = \tau_0\cdot L_c, \qquad (10)$$

где $n_ц$ – срок эксплуатации покрытия в годах, $L_c = \frac{d}{\lambda}$ - масштабный коэффициент; λ – размер испытываемых образцов, м; d – толщина плиты покрытия, м; σ – напряжение под колесом транспортного средства, Па; $\sigma_A(t)$ – амплитуда микронапряжений от расклинивающего действия льда в микротрещинах и порах покрытия.

С целью уточнения прогнозных данных и уменьшения влияния стохастических факторов, испытания образцов покрытия проводятся ежегодно.

В качестве примера ниже приведены прогнозы работоспособности жесткого дорожного покрытия на основе цементобетона при различных технологических схемах движения карьерного автотранспорта (различные скорости, грузо-

Таблица 2

Срок безремонтной эксплуатации дорожного покрытия в различных условиях (в годах)

Регион	Толщина бетонного покрытия, мм	Расчетный автомобиль								
		БелАз 7540			БелАз 7548			БелАз 7555		
		Расчётная скорость (км/час)								
		20	30	40	20	30	40	20	30	40
		Максимальная работоспособность (в годах)								
Кемерово	380	16	22	28	14	20	25	13	18	23
	420	17	24	30	15	22	27	14	20	26
	460	19	26	33	17	24	30	16	22	28
Екатеринбург	380	17	24	31	16	22	28	14	20	26
	420	19	27	34	17	24	30	16	22	28
	460	21	29	37	19	26	33	17	24	31
Красноярск	380	16	23	29	15	21	26	13	19	24
	420	18	25	32	16	23	29	15	21	27
	460	20	28	35	18	25	32	16	23	29

подъёмности автомобилей) в разных климатических зонах РФ.

Приведенная интенсивность движения транспортных средств принималась равной 100 расчётным автомобилям в сутки. Материал покрытия бетон с кинетическими константами разрушения: $\gamma = 1.10 \cdot 10^{-27}$, м^3; $U_0 = 1{,}66 \cdot 10^{-19}$, Дж (табл. 2).

Разработанные рекомендации по геофизическому мониторингу работоспособности карьерных дорог с жестким покрытием в условиях их реальной эксплуатации в различных природно-климатических зонах РФ существенно снижают трудоемкость количественного прогноза работоспособности жестких дорожных одежд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев, М.В.* Научные основы проектирования карьерного транспорта / М.В. Васильев, В.Л. Яковлев. – М.: Недра, 1972. – 201 с.
2. *Ушаков, В.В.* Трансортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорогв регионах с суровыми природно-климатическими усорвиями. В.В. Ушаков, А.В. Вишневский, // Вестник Читинской организации научно-техн. об-ва строителей / Читинский гос. техн. ун-т. – Чита,1997. – Вып. 1. – С.118-122.
3. *Иванов, В.В.* Физические основы электромагнитных процессов при формировании очага разрушения в массиве горных пород. Дис. доктора техн. наук.- Кемерово, 1994.

Коротко об авторах

Ардеев К.В., Иванов В.В., Хямяляйнен В.А. – Кузбасский государственный технический университет.