

УДК 622.831.32

К. В.Ардеев

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КАРЬЕРНЫХ ДОРОГ С ЖЕСТКИМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

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]

Дороги на рудниках и карьерах относятся к природно-техническим объектам, основные элементы структуры которых показаны в табл.1.

Повышение качества дорожного покрытия снижает расходы транспортирования горной массы при открытой разработке полезных ископаемых на 15÷35% (табл. 2) [2].

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

В настоящее время около 60% горной массы на карьерах России и более 85% на зарубежных карьерах перевозится автотранспортом. За последние 25 лет осевые нагрузки карьерного автотранспорта возросли более чем в 7,5 раз, поэтому значение жестких дорожных одежд будет расти. Жесткие дорожные одежды по своим прочностным показателям являются одними из наиболее перспективных, отвечают требованиям современного движения автомобилей с высокими осевыми нагрузками и скоростями и получили широкое распространение в различных странах [1].

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 накоплением 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 разрушения, 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 мате-

Таблица 1
Конструкции карьерных дорог некоторых российских горнодобывающих предприятий

Горные предприятия и карьеры	Конструктивные слои дороги		
	Подстилающий слой	Основание	Покрытие
		Материал и толщина слоя	
Ковдорский ГОК	Грунт земляного полотна	Песок (10 см)	Цементобетон (38 и 22 см)
Оленегорский ГОК	Песок (30 см)	Щебень (15 см)	Цементобетон (28 см)
Холбогданский угольный разрез	Грунт земляного полотна	Щебень (14 см)	Цементобетон (38 и 24 см)
Михайловский карьер	Грунт земляного полотна	Щебень (14 см)	Цементобетон (38 и 24 см)
Гайский карьер	Грунт земляного полотна	Щебень (14 см)	Цементобетон (38 и 24 см)
«Коашва» комбината Апатит	Песок (30 см)	Щебень (14 см)	Цементобетон (65 см)
Айхальский карьер	Песок (30 см)	Гравийно-песчаная смесь	Цементобетон (38 см)

риалов. 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 наиболее 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 $Q_{ll} \sim 10^{-11} \div 10^{-12}$ Кл/м; дипольный момент $P \sim 10^{-15} \div 10^{-16}$ Кл·м/м; и поверхностную плотность заряда $\delta_0 \sim 10^{-2} \div 10^{-5}$

Таблица 2
Снижение затрат при повышении капитальности карьерных дорог

Тип покрытия	Относительное значение показателей				
	Скорость движения	Расход горючесмазочных материалов	Износ шин	Расходы на ремонт и техобслуживание	Эксплуатационные расходы
Капитальные	1,7	0,74	0,67	0,7	0,55-0,6
Облегченные	1,3	0,85	0,75	0,8	0,65-0,75
Переходные	1	1	1	1	1
Низшие	0,8	1,3	1,5	1,2	1,8-2,2

Кл/м². В результате в процессе нагружения материалов возникают импульсы ЭМИ, частота образования которых в единице объема определяется следующей формулой

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

где C^* – предельная концентрация трещин, м⁻³; τ_0 – период тепловых атомных колебаний, с; U_0 – энергия активации разрушения материала, Дж; γ – активационный объём, м³; k – постоянная Больцмана, Дж/град; T – абсолютная температура, К°; σ – действующие в материале напряжения, Па.

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

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

$$\frac{(N^*/V)^{\frac{1}{\lambda}}}{\ell} \cong e, \quad (3)$$

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

где V – объем очага разрушения, м³; L_c – масштабный коэффициент; ℓ – размеры микротрещин, м; N^* – критическое число импульсов ЭМИ в объеме очага разрушения; τ – время до разрушения образца, с.



Рис 1. Блок-схема лабораторной установки для изучения разрушения образцов методом ЭМИ

Первое уравнение (2) представляет собой скорректированное кинетическое уравнение С.Н. Журкова для скорости трещинообразования, уравнение (3) - 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:

$$N_1 = \frac{kT \cdot N^*}{\tau_0 L_c \gamma \dot{\sigma}} \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{\gamma \cdot \dot{\sigma} \cdot t}{kT}\right) - 1 \right], \quad (5)$$

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

Учитывая что $n_u \cdot N_1 = N^*$, где n_u – число циклов до полного разрушения образца покрытия, можно найти кинетические константы разрушения методом наименьших квадратов отклонений теоретических от экспериментальных точек N_k кинетической кривой накопления импульсов ЭМИ:

$$\sum_{K=1}^n \left\{ N_k - \frac{kT \cdot N^*}{\tau_0 \gamma \dot{\sigma}} \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{\gamma \dot{\sigma} t_K}{kT}\right) - 1 \right] \right\}^2 \rightarrow \min_{U_0, \gamma} \quad (6)$$

Определив значения U_0 и γ , можно прогнозировать количество циклов приложения нагрузки до разрушения жесткого дорожного покрытия

$$n_u = \frac{\tau_0 \gamma \sigma_A f L_c}{kT} \exp\left(\frac{U_0}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{\gamma \sigma_A}{kT}\right) - 1 \right], \quad (7)$$

где σ_A – амплитуды 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 энер-

Таблица 3
Результаты исследований жестких покрытий карьерных дорог на морозостойкость

Серия	γ $m^3 \cdot 10^{27}$	U_0 $Dж \cdot 10^{19}$	r шт	σ_A МПа	$M_{эксп}$ шт	$M_{теор}$ шт
1	0,82	1,65	$4,75 \cdot 10^4$	3,30	264	268
2	0,88	1,59		0,60	222	189
3	1,31	1,63		1,20	185	191
4	1,01	1,65		2,40	211	212
5	1,09	1,62		0,34	207	123
7	2,97	1,63		0,2	263	208
8	1,79	1,68		0,38	269	250
9	1,10	1,66		0,7	232	254
10	1,13	1,71		0,5	279	234
11	1,21	1,51		1,36 \cdot 10^4	0,85	263
12	0,91	1,53		9,77 \cdot 10^3	0,81	293
13	1,57	1,55		5,68 \cdot 10^3	0,4	251
14	6,70	1,50		1,00 \cdot 10^4	1,57	219
						227

гиией активации разрушения U_0 равна $\beta \cdot U_0$, где $\beta=0,95$ 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-оттаивания при котором прочность образца уменьшается на 5%):

$$M = \frac{\frac{\tau_0 f r (\gamma \sigma_A - 40^0 K \beta \beta_0 / T_0) L_c}{k \cdot T_0} \cdot \exp\left(\frac{\beta U_0}{k T_0}\right)}{\exp\left(\frac{(\gamma \sigma_A - 40 \cdot \beta U_0 / T_0)}{k T_0}\right) - 1}, \quad (8)$$

где $40^0 K$ - 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 амплитуда внутренних микронапряжений - σ_A и количество микроповреждений структуры образцов r , накопленных к моменту 5%-ой 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 :

$$\sum_{i=1}^n \left\{ M_i - \frac{\tau_0 f r (\gamma_i \sigma_A - 40 \beta U_{0i} / T_0) L_c}{k T_0} \exp\left(\frac{\beta U_{0i}}{k T_0}\right) \right\}^2 \rightarrow \min_{\sigma_A, r} \quad (9)$$

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

Приравнивая производные (9) по σ_A и r 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 нагрузки-разгрузки регистрировали число накопленных микроповреждений структуры материала N_i (N_i – число зарегистрированных к моменту времени t_i микроповреждений). Процесс циклического нагружения повторяли до разрушения 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).

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, выдержаных 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 (рис. 2).

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.

Для подтверждения адекватности предложен-

Таблица 4
Результаты проверки адекватности предложенной модели эксперименту по F-критерию Фишера

№ серии	Число образцов n , шт	$S_{расч}^2$	$S_{эксп}^2$	Энергия активации U_0 , Дж· 10^{19}	Активаци- онный объём γ , м 3 · 10^{27}	Значение критерия Фишера при $1-\alpha = 0,05$	
						$F_{расч}$	$F_{k,k}$
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	1,10	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

ной нами кинетической модели выделения импульсов ЭМИ при разрушении материалов покрытия карьерных дорог экспериментальным данным проводилась статистическая проверка гипотезы по F-критерию Фишера (табл. 4), где $S_{расч}^2$ – дисперсия количества циклов нагружения-разгрузки, полученных расчёты путём, $S_{эксп}^2$ – эмпирическая дисперсия количества циклов нагружения-

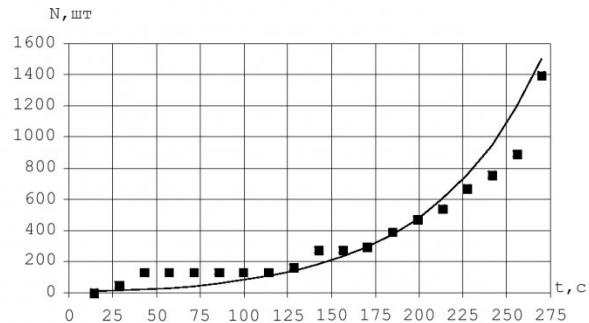


Рис. 2. Кинетика накопления импульсов ЭМИ при одном цикле нагружения до полного разрушения образца покрытия: N – число импульсов, шт; t – текущее время, с.; — теоретическая кривая накопления микроповреждений; ♦ точки экспериментальной кривой

разгрузки, полученных испытанием образцов, k_1 и k_2 – число степеней свободы соответственно большей и меньшей дисперсии; $F_{расч} < F_{k,k}$, соответственно проверка гипотезы при 5%-ом уровне значимости свидетельствует о непротиворечивости выборочных данных.

Обобщив результаты исследований, ожидаемую работоспособность покрытия дорожной одежды можно определить по формуле, получающейся из (4):

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

где n_u – срок эксплуатации покрытия в годах, $L_c = d / \ell$ – масштабный коэффициент; ℓ – раз-

мер испытываемых образцов, м; d – толщина пли-
ты покрытия, м; σ – напряжение под колесом
транспортного средства, Па; $\sigma_A(t)$ – амплитуда
микронапряжений от расклинивающего действия
льда в микротрецинах и порах покрытия.

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

В качестве примера ниже приведены прогнозы
работоспособности жесткого дорожного покрытия
на основе цементобетона при различных техноло-
гических схемах движения карьерного автотранс-
порта (различные скорости, грузоподъёмности

автомобилей) в разных климатических зонах РФ.

Приведенная интенсивность движения транс-
портных средств принималась равной 100 расчёт-
ным автомобилям в сутки. Материал покрытия
бетон с кинетическими константами разрушения:
 $\gamma=1.10 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3$; $U_0 = 1,66 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ (табл. 5).

Разработанные рекомендации по геофизиче-
скому мониторингу работоспособности карьерных
дорог с жестким покрытием в условиях их реаль-
ной эксплуатации в различных природно-
климатических зонах РФ существенно снижают
трудоемкость количественного прогноза работо-
способности 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.* / Транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог в регионах с су-
ровыми природно-климатическими условиями / В.В. Ушаков, А.В. Вишневский, // Вестник Читинской
организации научно-техн. общества строителей / Читинский гос. техн. ун-т. – Чита,1997. – Вып. 1. –
С.118-122.
3. *Иванов, В.В.* Физические основы электромагнитных процессов при формировании очага разру-
шения в массиве горных пород. Дис. ... докт. техн. наук.- Кемерово, 1994.

Автор статьи :

Ардеев

Кирилл Валерьевич
- аспирант каф. теоретической и
геотехнической механики