



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-316>

УДК 622.023.23

**Трещиностойкость границ между горными породами и бетоном и ее прогнозирование по акустическим свойствам**

А. С. Вознесенский , Е. И. Ушаков , Я. О. Куткин

Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

asvoznensenskii@misis.ru**Аннотация**

Актуальность темы определяется необходимостью решения задачи обеспечения сохранности и отсутствия разрушения объектов, содержащих границы раздела между горной породой и бетоном. К ним относятся шахтные стволы, плотины гидроэлектростанций в горных районах, железобетонная крепь тоннелей и другие, испытывающие воздействия как статических нагрузок от вышележащих пород и грунтов, так и динамические воздействия от взрывов и землетрясений. Лабораторные эксперименты проводились по методике Международного общества по механике горных пород (ISRM) на образцах с границами между гипсовым камнем и песчано-цементным раствором. Исследовался коэффициент трещиностойкости K_{IC} границ раздела в образцах. Цилиндрические образцы имели диаметр 40 мм и длину 150 мм с V-образным вырезом в средней части. Деформирование образцов при изгибе по трехточечной схеме позволило определить K_{IC} исходя из максимального усилия при 5–6 циклах. Среднее значение K_{IC} между породой и бетоном оказалось намного ниже, чем для горной породы и даже для образцов полностью из бетона. Для образцов без бетона среднее значение составило $1,327 \text{ МПа} \times \sqrt{\text{м}}$, а для полностью бетонных образцов $0,858 \text{ МПа} \times \sqrt{\text{м}}$. Среднее значение K_{IC} для образцов с бетоном составило $0,323 \text{ МПа} \times \sqrt{\text{м}}$, что в 4 раза меньше, чем для образцов без бетона, и в 2,5 раза меньше, чем для бетонных образцов. Образование калиброванной трещины при испытании приводит к относительному увеличению коэффициента внутренних механических потерь Q^{-1} , определяемого резонансным методом, до 30 %. Это позволяет оценить коэффициенты трещиностойкости K_{IC} границ раздела горная порода – бетон с использованием Q^{-1} . Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании, эксплуатации, а также организации неразрушающего контроля и мониторинга промышленных объектов горного производства, включающих данные границы раздела.

Ключевые слова

горные породы, бетон, гипс, кремний, граница, свойства, трещиностойкость, акустика, исследование, эксперимент, акустические измерения, упругие волны, скорость, потери, прогнозирование, деформация

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00103, <https://rscf.ru/project/24-27-00103/>.

Благодарности

Авторы выражают благодарность главному инженеру шахты «Кнауф Гипс Новомосковск» О. В. Савицкому за помощь в отборе образцов горных пород, В. Б. Иванову, П. И. Дубинину за помощь в изготовлении экспериментальной установки и подготовке образцов к испытаниям.

Для цитирования

Voznesenskii A. S., Ushakov E. I., Kutkin Ya. O. Fracture toughness of rock-concrete interfaces and its prediction based on acoustic properties. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):5–14. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-316>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Fracture toughness of rock-concrete interfaces and its prediction based on acoustic properties

A. S. Voznesenskii , E. I. Ushakov , Ya. O. Kutkin

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

asvoznensenskii@misis.ru**Abstract**

The relevance of the subject is determined by the need to solve the problem of ensuring the safety and prevent failure of facilities containing an interface between rock and concrete. These include mine shafts, hydroelectric dams in mountainous areas, reinforced concrete tunnel supports and others that are subjected to both static



loads from overlying rocks and soils and dynamic loads from explosions and earthquakes. We performed laboratory tests according to the International Society for Rock Mechanics (ISRM) methodology on specimens with interfaces between gypsum stone and sand-cement mortar. The fracture toughness coefficient K_{IC} of the interfaces in the specimens was investigated. The cylindrical specimens were 40 mm in diameter and 150 mm long with a V-shaped notch in the middle part. The specimens bending strain measured using a three-point pattern allowed the K_{IC} to be determined based on the maximum force at 5–6 cycles. The average K_{IC} value for interface between rock and concrete proved much lower than that for rock and even for specimens made entirely of concrete. For the specimens without concrete, the average value was $1.327 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, and for fully concrete specimens, $0.858 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. The average value K_{IC} for the specimens with concrete was $0.323 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, which was 4 times lower than that for the specimens without concrete and 2.5 times lower than that for the concrete specimens. The formation of a calibrated fracture during testing results in a relative increase in the internal mechanical loss factor Q^{-1} , determined by the resonance method, by up to 30%. This allows estimating K_{IC} fracture toughness coefficients of rock-concrete interfaces using Q^{-1} . The obtained results can be used in actual practice in the design, operation, and organization of nondestructive testing and monitoring of industrial mining facilities that include these interfaces.

Keywords

rocks, concrete, gypsum, flintstone, interface, properties, fracture toughness, acoustics, study, testing, acoustic measurements, elastic waves, velocity, losses, prediction, strain

Financing

The research was carried out at the expense of grant No. 24-27-00103 of the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/24-27-00103>

Acknowledgments

The authors would like to thank O.V. Savitsky, Chief Engineer of the Knauf Gips Novomoskovsk mine, for his assistance in rock sampling, and V.B. Ivanov, P.I. Dubinin for the assistance in the fabrication of the testing installation and preparation of specimens for testing.

For citation

Voznesenskii A.S., Ushakov E.I., Kutkin Ya.O. Fracture toughness of rock-concrete interfaces and its prediction based on acoustic properties. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):5–14. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-316>

Введение

В современном горном деле объектом изучения часто являются границы раздела между горной породой и бетоном, встречающиеся во многих наземных и подземных сооружениях, таких как шахтные стволы, плотинные гидроэлектростанций в горных районах, железобетонная крепь тоннелей и другие подобные объекты. Одной из задач при сооружении и эксплуатации таких конструкций является обеспечение их сохранности и отсутствия разрушения при воздействии как статических нагрузок от вышележащих пород и грунтов, так и динамических воздействий. Источниками динамических воздействий являются сейсмолы при взрывах [1] и землетрясениях [2, 3]. Рассматриваемая тема является составной частью решения указанной задачи и посвящена экспериментальным исследованиям прочностных свойств границ раздела между горной породой и бетоном.

Теоретическое обоснование описанных ниже исследований связано с фундаментальными работами А. Гриффитса [4]. В рамках этой теории рассматривается коэффициент интенсивности напряжений K [5]. При растяжении коэффициент интенсивности напряжений первой моды деформаций $K_I = \sigma\sqrt{\pi l}$, где σ – действующее напряжение, l – длина трещины. Свойство материала сохранять свою целостность оценивается соответствующим коэффициентом трещиностойкости (КТ) K_{IC} , определяемым из экспериментов. Он характеризует максимальную длину трещины, при которой не происходит ее роста. Условие отсутствия роста трещин

и последующего разрушения описывается выражением $K_I \leq K_{IC}$.

Знание действующих напряжений σ , а также КТ в сочетании с параметрами трещиноватых массивов пород и бетонной крепи позволит обеспечить их сохранность при проектировании, строительстве и эксплуатации горных предприятий в условиях действующих статических и динамических нагрузок.

КТ применим как к отдельным материалам, таким как металлы, бетон, композитные материалы, так и к границам раздела между ними. Многие исследователи изучают КТ для металлов и сплавов [6, 7], в том числе разнородных [8]. Для композиционных материалов КТ исследуются в [9, 10]. КТ также применяется при оценке прочностных свойств бетона [11], в том числе для особых типов бетона, таких как фибробетон [12]. КТ использовался для новых печатных материалов [13], изготавливаемых на принтерах. Гораздо меньшее количество публикаций посвящено исследованиям КТ горных пород [14], особенно границам между бетоном и горными породами [15].

Как правило, методики экспериментальных исследований используют трех- или четырехточечные схемы нагружения при изгибе образцов и прямоугольных балок [16, 17], полудисков [18], дисковых образцов [19] и кубов с вырезом [20]. Для горных пород используется методика определения КТ, рекомендованная Международным обществом механики горных пород (ISRM) [21]. КТ границ раздела между различными породами или минералами также представляет интерес при оценке устойчивости горных массивов.

В [22, 23] описана методика и представлены результаты определения коэффициента трещиностойкости применительно к границам раздела между различными типами горных пород, а также определены диапазоны КТ для некоторых их комбинаций.

Цель, а также новизна данной работы заключаются в оценке КТ первой моды K_{IC} границ раздела между различными типами горных пород и бетоном. Кроме того, определены акустические свойства образцов горных пород и проведена оценка их взаимосвязи с K_{IC} . Эти свойства включали скорости продольных и поперечных упругих волн, а также коэффициент внутренних механических потерь Q^{-1} [24, 25] для оценки возможности прогнозирования K_{IC} по акустическим измерениям.

Решаемые задачи включали:

- обоснование методики испытаний по определению КТ границ между горными породами и бетоном;
- определение скоростей распространения упругих волн путем ультразвукового импульсного прозвучивания до и после испытания для оценки влияния на них образующейся трещины;
- определение резонансным методом коэффициента потерь Q^{-1} и его изменений при образовании эталонной трещины;
- испытание образцов при изгибе по методике ISRM для определения K_{IC} границ раздела горная порода – бетон;
- обработку и сравнительный анализ полученных результатов с установлением диапазонов значений КТ между горными породами различных типов, а также между горными породами и бетоном;
- практические выводы о полученных значениях КТ границ раздела между горными породами различных типов и бетоном для учета при проектировании и эксплуатации конструктивных элементов систем разработки на горных предприятиях.

1. Материалы и методы

Для проведения испытаний были изготовлены образцы-цилиндры диаметром 40 мм и длиной 150 мм, состоящие из двух равных частей – горных пород с Новомосковского гипсового месторождения (г. Новомосковск, Тульская область, Россия) [22, 23] и песчано-цементного раствора. Была приготовлена серия из 19 таких образцов и выдержана до полного затвердевания раствора в течение четырех месяцев (рис. 1, а). Кроме того, четыре образца были изготовлены полностью из песчано-цементного раствора (рис. 1, б). В образцах были сделаны V-образные прорезы для проведения испытаний по методике ISRM, описанных ниже.

Образцы для испытаний были маркированы в соответствии с оригинальными образцами гипса длиной 150 мм, половины из которых были использованы для изготовления образцов с бетонным покрытием С. Они обозначены как:

- гипсовый камень GGC;
- границы раздела гипсового камня и кремния GKC;
- кремний KKC;
- граница раздела гипса и кремния с прожилками углеродистых глин GUKC.

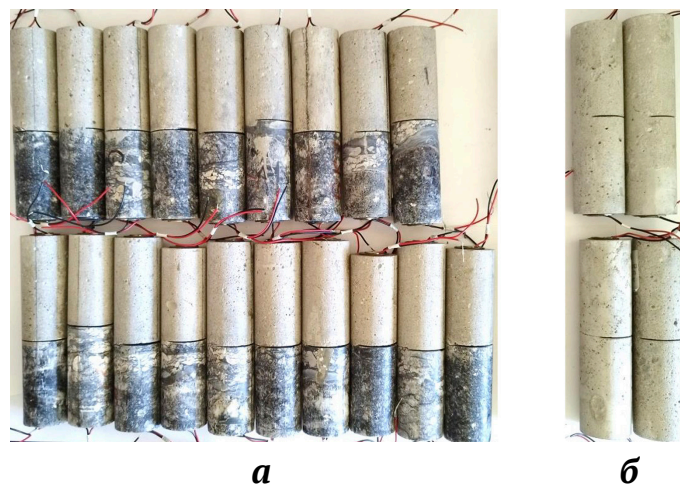


Рис. 1. Образцы с границами раздела гипсовый камень – цементный камень – а и образцы из цементного камня с прорезями – б

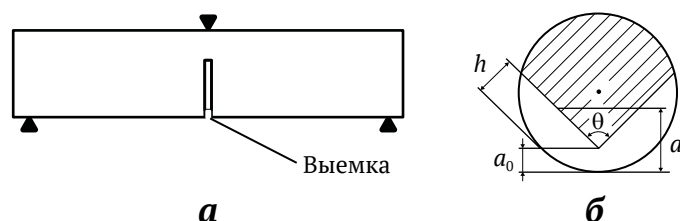


Рис. 2. Схема трехточечного испытания на образце с вырезом – а и поперечное сечение образца с вырезом – б

Например, GKC3-1 означал образец с границей раздела между бетоном и половиной образца номер 1 из гипса и кремния GK-3.

Испытания на цилиндрических образцах длиной 150 мм с вырезами проводились в соответствии с трехточечной схемой, показанной на рис. 2, а. Вырез имел V-образную форму, рис. 2, б, а угол θ был равен 90° .

В расчетах использовалась формула (1) из [21] для определения коэффициента трещиностойкости:

$$K_{IC} = \frac{A_{\min} P_{\max}}{D^{1.5}}, \quad (1)$$

$$A_{\min} = \left[\frac{1,835 + 7,15a_0}{D} + 9,85 \left(\frac{a_0}{D} \right)^2 \right] \cdot \frac{S}{D},$$

где K_{IC} – коэффициент трещиностойкости, МПа $\sqrt{м}$; $P_{\max}$ – максимальное усилие изгиба, кН; D – диаметр образца шевронного изгиба, см; a_0 – расстояние между углублениями шеврона и поверхностью образца, см; S – расстояние между точками опоры, см.

При испытаниях использовалась установка на основе комплекса ASIS (ООО «НПО Геотек», Пенза, Россия). Образцы испытывались по схеме трехточечного изгиба. Помимо системы, задающей циклические перемещения рамы, использовалась вторая система,

регистрировавшая усилие и величину прогиба. Два датчика линейных перемещений (LVDT) с диапазоном измерения 10 мм регистрировали прогиб непосредственно на образце. Эти преобразователи были подключены к 18-разрядному АЦП измерительной системы QMBox (R-Technology, Москва, Россия).

Установка для определения внутренних механических потерь включала в себя генератор сигналов серии JDS 2900 с усилителем мощности DPA 1698, осциллограф GDS-71022 с внешним предусилителем и держатель образца. К торцам образца были приклеены пьезоэлектрические преобразователи толщиной 1,2 мм для измерения акустических потерь резонансным методом.

Скорости продольных P - и поперечных S -волн измерялись с помощью ультразвукового прибора (ООО «Экогеос Пром», Тверь, Россия). Скорости были определены по времени, затрачиваемому упругими импульсами на прохождение через образцы.

Испытания в циклах предусматривали максимальные перемещения рамы, равные 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,40 мм. Минимальное перемещение составляло 0,05 мм. Скорость перемещения составляла 0,2 мм/мин.

Акустические испытания вдоль длинной оси образцов включали измерение скоростей распространения продольных V_p и поперечных V_s упругих волн в породе по стандартной методике. Внутренние механические потери оценивались по коэффициенту потерь (или обратной добротности) Q^{-1} . Они были проведены в дополнение к механическим испытаниям два раза – до и после испытания образца.

Экспериментальные измерения Q^{-1} были проведены путем частотного сканирования резонансных характеристик образца. Сигнал с генератора гармонических колебаний SFG-2110 подавался на возбуждающую пьезокерамическую пластину диаметром 20,0 мм и толщиной 1,5 мм, которая была установлена на одном конце образца. Со второй аналогичной пьезоэлектрической пластины на противоположном конце образца сигнал подавался на предварительный

усилитель с полосой пропускания 20–500 кГц, а затем на цифровой осциллограф GDS-71022. Коэффициент Q^{-1} был рассчитан по формуле

$$Q^{-1} = \frac{\Delta f}{f_0}, \quad (2)$$

где Δf – полоса частот на уровне $1/\sqrt{2}$ от максимума резонансной кривой; f_0 – резонансная частота.

2. Результаты экспериментов

2.1. Результаты измерений коэффициента K_{IC} для образцов горная порода – бетон

На рис. 3–6 для примера показаны кривые зависимости нагрузки на образец P и прогиба y от времени, а также зависимости нагрузки P от прогиба y . Полный набор графиков для всех 19 образцов с контактами горная порода – бетон и четырех бетонных образцов размещен в хранилище data.mendeley.com [26].

2.2. Результаты испытаний образцов бетона

На рис. 6 для примера показаны аналогичные результаты испытаний образцов из бетона.

2.3. Акустические свойства образцов с границей раздела порода – бетон

В табл. 1 и 2 приведены результаты измерения K_{IC} по формуле (1), а также акустических свойств образцов горных пород с бетоном и бетонных образцов до и после испытаний. В таблицах использованы следующие обозначения:

P_{max} – максимальная нагрузка при циклическом нагружении образца;

K_{IC} – коэффициент трещиностойкости первой моды деформаций;

V_p – скорость распространения продольных волн;

V_s – скорость распространения поперечных волн;

f_0 – резонансная частота образца;

Q^{-1} – коэффициент внутренних механических потерь.

В табл. 1 прочерками отмечены образцы, разрушенные во время испытаний.

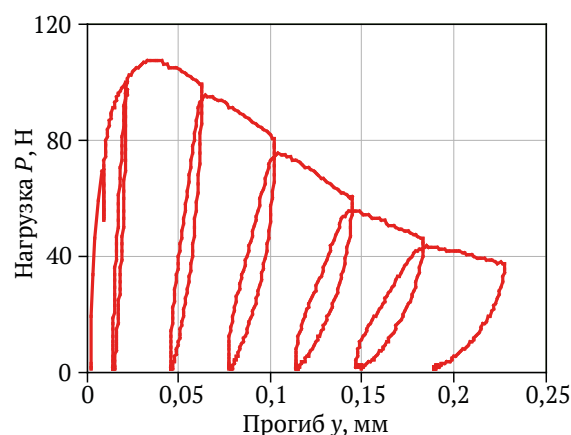
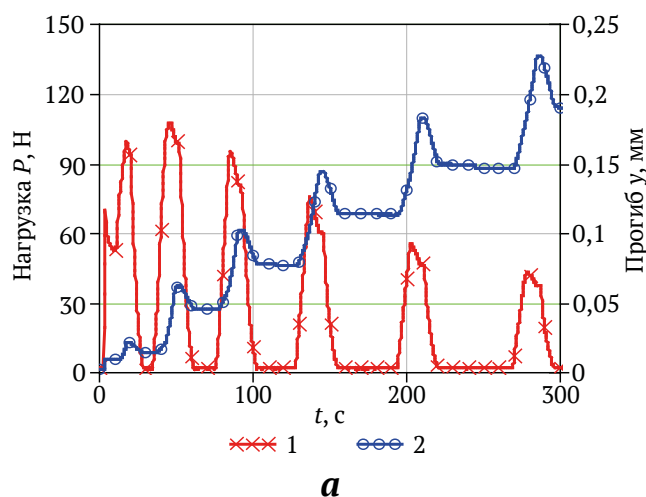
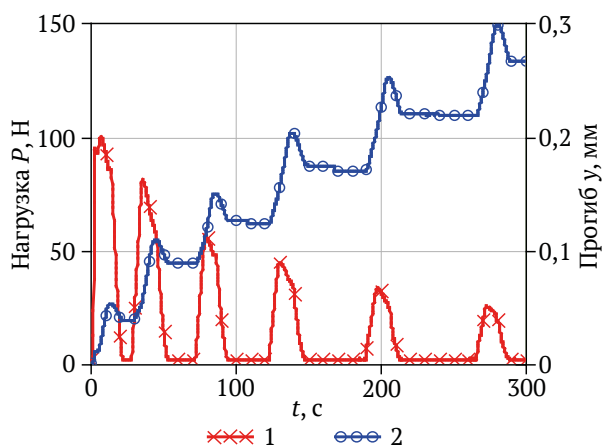
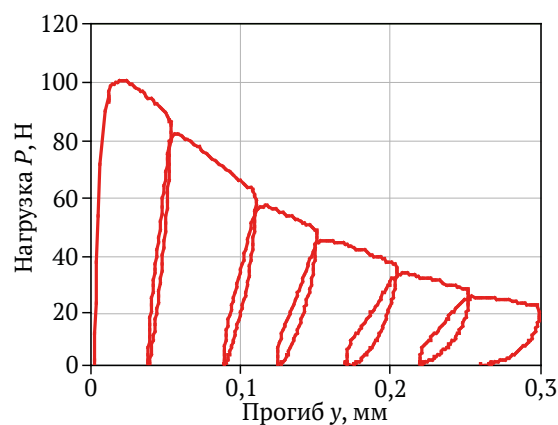


Рис. 3. Кривые зависимостей нагрузки и прогиба от времени – а и зависимости нагрузки от прогиба – б при циклическом нагружении образца GKC3–2

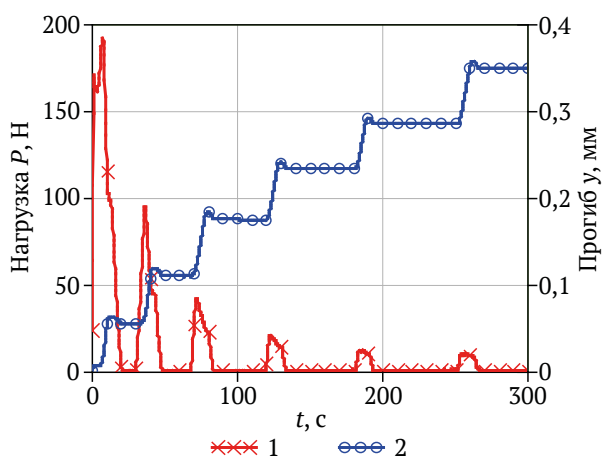


а

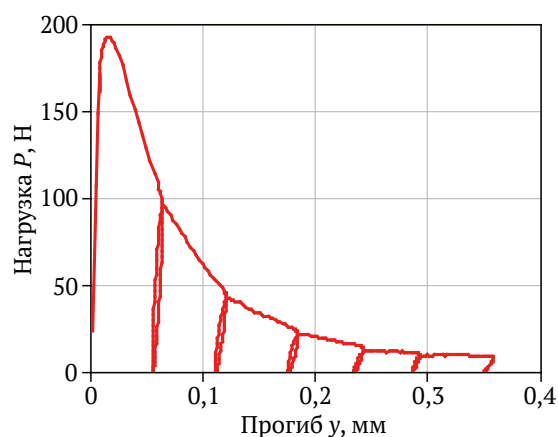


б

Рис. 4. Кривые зависимостей нагрузки и прогиба от времени – *а* и зависимости нагрузки от прогиба – *б* при циклическом нагружении образца GKC5–1

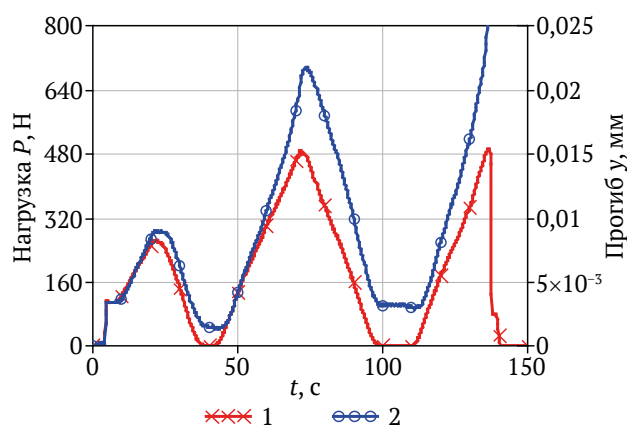


а

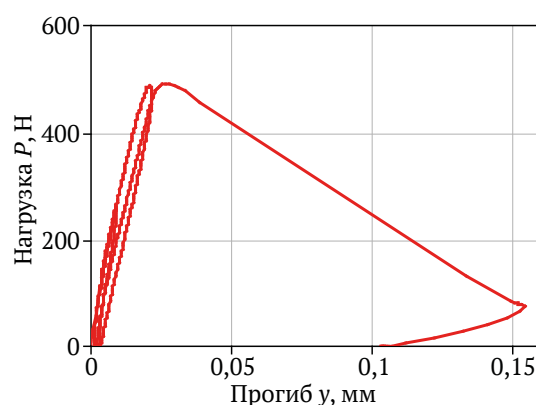


б

Рис. 5. Кривые зависимостей нагрузки и прогиба от времени – *а* и зависимости нагрузки от прогиба – *б* при циклическом нагружении образца GKC5–2



а



б

Рис. 6. Кривые зависимостей нагрузки и прогиба от времени – *а* и зависимости нагрузки от прогиба – *б* при циклическом нагружении образца C1



Таблица 1

Свойства образцов с границей раздела горная порода – бетон

Образец	P_{max} , Н	K_{IC} , МПа $\times\sqrt{м}$	До испытания				После испытания			
			V_p , м/с	V_s , м/с	f_0 , Гц	$Q^{-1} \times 10^{-3}$	V_p , м/с	V_s , м/с	f_0 , Гц	$Q^{-1} \times 10^{-3}$
GGC2-1	216,30	0,395	4019	2538	22848	5,26	3942	2515	8992	15,63
GGC2-2	188,42	0,344	4032	2649	10765	4,10	4012	2706	10270	5,18
GGC3-1	154,66	0,282	3831	2418	10205	3,43	–	–	–	–
GGC3-2	67,07	0,122	3774	2515	9110	4,39	–	–	–	–
GKC1-1	229,03	0,418	4125	2953	10402	6,06	4044	2917	10102	4,27
GKC1-2	210,92	0,385	3876	2535	9190	4,13	3684	2005	47750	3,61
GKC2-2	292,63	0,534	4136	2665	11374	4,67	4072	2923	9002	10,53
GKC3-1	262,79	0,480	3831	2502	9925	2,72	3684	1857	48910	4,29
GKC3-2	107,68	0,197	3852	2484	9117	3,40	–	–	–	–
GKC5-1	100,35	0,183	3780	2500	9360	5,65	3549	1919	50900	2,77
GKC5-2	192,29	0,351	3975	2881	11000	4,00	–	–	–	–
KKC2-1	238,32	0,435	3937	3337	9620	6,67	–	–	–	–
KKC2-2	165,91	0,303	3854	2550	8967	4,57	3937	2582	49000	5,21
KKC3-1	139,00	0,254	3872	2841	10402	6,33	3633	2477	–	–
KKC3-2	121,38	0,222	4068	2673	10617	5,18	3942	2695	–	–
KKC5-1	167,38	0,306	4010	2574	11240	4,18	3989	2929	10342	7,75
KKC5-2	292,63	0,534	4212	2870	10823	5,56	4201	3236	16738	5,81
GUKC1-1	81,26	0,148	3443	2373	7030	9,81	–	–	–	–
GUKC1-2	159,55	0,291	3900	2675	9061	3,97	–	–	–	–
Среднее	178,29	0,323	3922	2660	10581	4,95	3890	2563	26200	6,51

Таблица 2

Свойства бетонных образцов

Образец	P_{max} , Н	K_{IC} , МПа $\times\sqrt{м}$	До испытания				После испытания			
			V_p , м/с	V_s , м/с	f_0 , Гц	$Q^{-1} \times 10^{-3}$	V_p , м/с	V_s , м/с	f_0 , Гц	$Q^{-1} \times 10^{-3}$
C1	492,3	0,899	3571	2540	22,6	7,29	3120	2100	–	–
C2	429,6	0,784	3392	2402	19,3	5,70	3242	1920	–	–
C3	503,0	0,918	3297	2430	21,2	5,90	3170	1616	–	–
C4	456,1	0,832	3414	2495	22,8	6,34	3327	1849	–	–
Среднее	470,2	0,858	3418	2466	21,5	6,31	3215	1808	–	–

Таблица 3

Коэффициенты трещиностойкости K_{IC} горных пород и контактов между ними без бетона [22, 23]

Образец	P_{max} , Н	K_{IC} , МПа $\times\sqrt{м}$	Образец	P_{max} , Н	K_{IC} , МПа $\times\sqrt{м}$
GG-1	639	0,832	GUK-3	1194	1,317
GG-2	985	0,995	GK-3	1147	1,495
GG-3	988	1,089	GK-5	1225	1,351
GG-4	817	0,901	KK-1	–	–
UG-1	833	0,919	KK-2	2039	2,447
GUK-1	825	0,950	KK-3	–	–
GUK-2	1100	1,161	KK-4	2232	2,461



После испытаний не удалось получить четкого резонанса в образце из-за увеличения потерь в бетоне, что отмечено прочерками в табл. 2.

Для сравнения в табл. 3 представлены данные предыдущих испытаний образцов горных пород и их границ раздела без бетона.

3. Обсуждение результатов

Проанализируем формы кривых на рис. 3–6, полученных при испытании образцов в режиме заданных циклических изгибных деформаций с увеличением максимальных перемещений в каждом последующем цикле.

Заслуживают внимания особенности пластического деформирования образцов. Они заключались в увеличении остаточных пластических деформаций после каждого цикла деформирования и проявлялись в виде характерного петлевидного рисунка кривых $P(y)$ со сдвигом вправо каждой последующей петли. На графиках четко виден участок экстремальной деформации, на котором максимальная нагрузка уменьшалась с увеличением числа циклов. Коэффициент K_{IC} рассчитывался на основе наибольшего максимального значения P_{max} . Для наглядности все результаты теста K_{IC} приведены на диаграмме на рис. 7.

Анализ значений K_{IC} , приведенных в табл. 1 и 3, а также на рис. 7, позволяет нам сделать следующие выводы.

Без бетона границы раздела имеют относительно высокие значения K_{IC} , особенно КК, для которых K_{IC} составляет более 2. Наличие кремния, как правило, характеризуется высокими значениями K_{IC} даже при наличии слабых углистых прослоек. Отсутствие кремния, как, например, в случае с GG, характеризуется пониженными значениями K_{IC} . Для чистого бетона K_{IC} имеет значения, близкие к границам раздела GG. Для границ раздела между породой и бетоном значения K_{IC} чрезвычайно низки. Это может быть объяснено слабой адгезией при формировании контакта между ними. Разница особенно очевидна при сравнении средних значений. Среднее значение K_{IC} для образцов без бетона это $1,327 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, среднее значение для бетона $0,858 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, а для образцов с бетоном оно составило $0,323 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, что в 4 раза меньше, чем для образцов без бетона, и в 2,5 раза меньше, чем для бетонных образцов.

Как следует из данных сводной табл. 1, в большинстве случаев появление трещины в его средней части при испытаниях на изгиб приводит к уменьшению как скорости V_p , так и скорости V_s . Изменения считались значимыми, если они выходили за границы $\pm 2\%$ от первоначального значения до испытания. Количество образцов, у которых скорость V_p оказалась неизменной, составило 42 %, а скорость V_s – 40 %. При этом половина образцов показала уменьшение V_p , а скорость V_s показала как уменьшение, так и увеличение в равных долях. F_0 и Q^{-1} продемонстрировали изменение во всех случаях.

Количественная оценка изменений средних значений V_p и V_s показывает незначительные их снижения, они составляют 0,992 и 0,964 от первоначальных значений. Однако такие незначительные изменения могут не являться достаточно надежным результатом. В то же время среднее значение коэффициента потерь Q^{-1} при образовании трещины после испытания показывает увеличение в 1,32 раза, что можно использовать при оценке состояния границы раздела между горной породой и бетоном при организации неразрушающего контроля или мониторинга реальных объектов.

Установление возможности прогнозирования K_{IC} на основе акустических свойств объектов является одной из важных связанных с этим целей. В данном случае такая оценка производится на основе коэффициента корреляции R и среднеквадратичного отклонения RMS . Расчет коэффициентов корреляции различных сочетаний акустических свойств с K_{IC} образцов с границами раздела горная порода – бетон был проведен с использованием программного обеспечения Statistica. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Связь между скоростями упругих волн V_p , V_s коэффициентом потерь Q^{-1} в различных сочетаниях с коэффициентом K_{IC} для образцов с границами раздела горная порода – бетон

Параметр	V_p	V_s	Q^{-1}	V_p, V_s	V_p, Q^{-1}	V_s, Q^{-1}	V_p, V_s, Q^{-1}
R	0,674	0,447	0,190	0,685	0,675	0,533	0,685
RMS	0,093	0,306	0,124	0,099	0,096	0,110	0,098

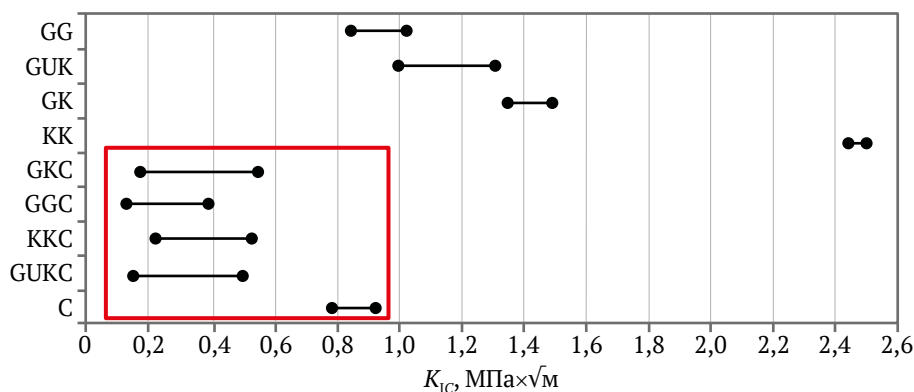


Рис. 7. Диапазоны изменения коэффициента K_{IC} для горных пород, а также для границ раздела горная порода – бетон и бетона (обведено линией)



Как следует из этих данных, наибольшая взаимозависимость K_{IC} наблюдается с V_p . При использовании многомерной статистики другие свойства позволяют немного увеличить коэффициент корреляции. В то же время даже в этом случае при $R = 0,685$, хотя взаимозависимость и существует, ее нельзя назвать очень сильной. Среднеквадратическое отклонение RMS характеризует точность такого прогноза. В этом случае среднеквадратическое отклонение составляет $0,098 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Среднее значение K_{IC} равно $0,323 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Относительная погрешность составляет около 30 %.

Заключение

Показана актуальность экспериментального изучения коэффициента трещиностойкости K_{IC} границ раздела горная порода – бетон, который может быть использован на практике в горной промышленности при проектировании, строительстве и эксплуатации наземных и подземных сооружений, таких как стволы и капитальные выработки шахт, плотины гидроэлектростанций, автомобильные и железнодорожные туннели, а также другие объекты как подземного, так и наземного назначения, имеющие границы раздела горных пород с бетоном.

В ходе текущего исследования изучалась трещиностойкость границ раздела между породами, включающими гипсовый камень и бетон. Для границ раздела между породой и бетоном значения коэффициента трещиностойкости первой моды деформаций

K_{IC} чрезвычайно низки. Это может быть объяснено слабой адгезией при формировании контакта между ними. Разница особенно очевидна при сравнении средних значений. Среднее значение K_{IC} для образцов без бетона – $1,327 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, среднее значение для бетона – $0,858 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, а для образцов с бетоном оно составило $0,323 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, что в 4 раза меньше, чем для образцов без бетона, и в 2,5 раза меньше, чем для бетонных образцов.

Оценка влияния образующейся трещины на средние значения скоростей продольной V_p и поперечной V_s упругих волн показывает незначительные снижения, которые составляют 0,992 и 0,964 от первоначальных значений соответственно. В то же время коэффициент потерь Q^{-1} при образовании трещины разрыва после испытания показывает увеличение в 1,32 раза, что можно принять как статистически значимое.

Оценка способности прогнозировать коэффициент K_{IC} на основе акустических свойств показала, что наибольшая корреляция наблюдается со скоростью V_p . При использовании многомерной статистики другие свойства позволяют незначительно увеличить коэффициент корреляции R . В то же время даже в этом случае при $R = 0,685$ его нельзя назвать сильным, хотя связь существует. Относительная погрешность при этом составляет 30 %.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, эксплуатации, а также организации неразрушающего контроля и мониторинга промышленных объектов горного производства.

Список литературы / References

1. Кочанов А.Н., Одинцев В.Н. Волновое предразрушение монолитных горных пород при взрыве. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016;(6):38–48. (Trans. ver.: Kochanov A.N., Odintsev V.N. Wave prefracturing of solid rocks under blasting. *Journal of Mining Science*. 2016;52(6):1080–1089. <https://doi.org/10.1134/S1062739116061613>)
Kochanov A.N., Odintsev V.N. Wave prefracturing of solid rocks under blasting. *Journal of Mining Science*. 2016;52(6):1080–1089. <https://doi.org/10.1134/S1062739116061613> (Orig. ver.: Kochanov A.N., Odintsev V.N. Wave prefracturing of solid rocks under blasting. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopayemykh*. 2016;(6):38–48. (In Russ.))
2. Зверева А.С., Собисевич А.Л., Габсатарова И.П. Добротность геофизической среды восточной зоны Северного Кавказа. *Физика Земли*. 2024;(1):140–156. <https://doi.org/10.31857/S0002333724010091>
Zvereva A.S., Sobisevich A.L., Gabsatarova I.P. Q factor in the geophysical medium of the Northeast Caucasus. *Fizika Zemli*. 2024;(1):140–156. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002333724010091>
3. Грабкин О.В., Замараев С.М., Лашченков В.А. и др. Геология и сейсмичность зоны БАМ (от Байкала до Тынды). *Структурно-вещественные комплексы и тектоника*. Новосибирск: Наука; 1983. 192 с.
Grabkin O.V., Zamaraev S.M., Lashchenov V.A. et al. *Geology and seismicity in the BAM region (from Baikal to Tynda). Structural-material complexes and tectonics*. Novosibirsk: Nauka Publ. House; 1983. 192 p. (In Russ.)
4. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. 1921;221(582–593):163–198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>
5. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений*. Под ред. Ю. Мураками. Т. 2. М.: Мир; 1990. 1016 с.
Murakami Yu. (Ed.) *Handbook of stress intensity coefficients*. Vol. 2. Moscow; Mir Publ. House; 1990. 1016 p. (In Russ.)
6. Sezgin J.-G., Bosch C., Montouchet A. et al. Coupled hydrogen and phosphorous induced initiation of internal cracks in a large 18MnNiMo5 component. *Engineering Failure Analysis*. 2019;104:422–438. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.014>



7. Wang Y., MacDonald A., Xu L. et al. Engineering critical assessment and variable sensitivity analysis for as-welded S690 steels. *Engineering Failure Analysis*. 2020;109:104282. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104282>
8. Beygi R., Carbas R.J.C., Barbosa A.Q. et al. A comprehensive analysis of a pseudo-brittle fracture at the interface of intermetallic of η and steel in aluminum/steel joints made by FSW: Microstructure and fracture behavior. *Materials Science and Engineering: A*. 2021;824:141812. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141812>
9. Eskandari S., Andrade Pires F.M., Camanho P.P. et al. Analyzing the failure and damage of FRP composite laminates under high strain rates considering visco-plasticity. *Engineering Failure Analysis*. 2019;101:257–273. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.008>
10. Mega M., Banks-Sills L. Comparison of methods for determination of fracture toughness in a multi-directional CFRP laminate. *Procedia Structural Integrity*. 2020;28:917–924. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.064>
11. Ryabchikov A., Kiviste M., Udras S.M. et al. The experimental investigation of the mechanical properties of steel fibre-reinforced concrete according to different testing standards. *Agronomy Research*. 2020;18:969–979. <https://doi.org/10.15159/ar.20.070>
12. Conforti A., Minelli F., Plizzari G.A., Tiberti G. Comparing test methods for the mechanical characterization of fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*. 2018;19(3):656–669. <https://doi.org/10.1002/suco.201700057>
13. Valean C., Maravina L., Marghita M. et al. The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness. *Procedia Structural Integrity*. 2020;28:1134–1139. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.128>
14. Wang Y., Hu X. Determination of tensile strength and fracture toughness of granite using notched three-point-bend samples. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017;50(1):17–28. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1098-6>
15. Rong H., Wang Y.J., Zhao X.Y., She J. Research on fracture characteristics of rock-concrete interface with different roughness. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics* 2019;36(10):96–103. (In Chinese) <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.09.0485>
16. Kožar I., Torić Malić N., Simonetti D., Smolčić Ž. Bond-slip parameter estimation in fiber reinforced concrete at failure using inverse stochastic model. *Engineering Failure Analysis*. 2019;104:84–95. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.019>
17. Kožar I., Bede N., Mrakovčić S., Božić Ž. Layered model of crack growth in concrete beams in bending. *Procedia Structural Integrity*. 2021;31:134–139. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.022>
18. Lu D.X., Bui H.H., Saleh M. Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behaviour of asphalt concretes in the SCB test. *Engineering Fracture Mechanics*. 2020;242:107452. <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2020.107452>
19. Nazerigivi A., Nejati H.R., Ghazvinian A., Najigivi A. Effects of SiO₂ nanoparticles dispersion on concrete fracture toughness. *Construction and Building Materials*. 2018;171:672–679. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.224>
20. Seitzl S., Ríos J.D., Cifuentes H. Comparison of fracture toughness values of normal and high strength concrete determined by three point bend and modified disk-shaped compact tension specimens. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2017;11(42):56–65. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.42.07>
21. Ouchterlony F., Franklin J.A., Zongqi S. et al. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1988;25(2):71–96.
22. Voznesenskii A.S., Osipov Y.V., Ushakov E.I. et al. Effect of weak inclusions on the fracture toughness of interfaces between various rocks. *Engineering Failure Analysis*. 2023;146:107140. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107140>
23. Voznesenskii A.S., Osipov Y.V., Ushakov E.I., Semyonov Y.G. Fracture toughness of interfaces between various minerals and rocks. *Procedia Structural Integrity*. 2023;46:155–161. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.06.027>
24. Mochugovskiy A.G., Mikhaylovskaya A.V., Zadorognyy M.Y., Golovin I.S. Effect of heat treatment on the grain size control, superplasticity, internal friction, and mechanical properties of zirconium-bearing aluminum-based alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;856:157455. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157455>
25. Blanter M.S., Golovin I.S., Neuhäuser H., Sinning H.R. *Internal friction in metallic materials*. A handbook. Springer Series in Materials Science. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg; 2007. 541 p.
26. Ushakov E.I., Voznesenskii A.S. The fracture toughness of interfaces between rocks and concrete. The results of experimental investigations. *Mendeley Data*. 2024;1. <https://doi.org/10.17632/792rfcf59m.1>



Информация об авторах

Александр Сергеевич Вознесенский – доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-0926-1808](https://orcid.org/0000-0003-0926-1808), Scopus ID [57210211383](https://scopus.org/authorid/57210211383); e-mail asvoznensenskii@misis.ru

Егор Игоревич Ушаков – аспирант кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3579-6515](https://orcid.org/0000-0003-3579-6515), Scopus ID [57467483000](https://scopus.org/authorid/57467483000); e-mail m1800087@edu.misis.ru

Ярослав Олегович Куткин – кандидат технических наук, доцент кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-2644-3371](https://orcid.org/0000-0003-2644-3371), Scopus ID [56554219800](https://scopus.org/authorid/56554219800); e-mail kutkin.yo@misis.ru

Information about the authors

Aleksandr S. Voznesenskii – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Physical Processes of Mining and of Geocontrol, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-0926-1808](https://orcid.org/0000-0003-0926-1808), Scopus ID [57210211383](https://scopus.org/authorid/57210211383); e-mail asvoznensenskii@misis.ru

Egor I. Ushakov – PhD student of the Department of Physical Processes of Mining and of Geocontrol, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3579-6515](https://orcid.org/0000-0003-3579-6515), Scopus ID [57467483000](https://scopus.org/authorid/57467483000); e-mail m1800087@edu.misis.ru

Yaroslav O. Kutkin – Cand. Sci. (Eng.), Associate professor of the Department of Physical Processes of Mining and of Geocontrol, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-2644-3371](https://orcid.org/0000-0003-2644-3371), Scopus ID [56554219800](https://scopus.org/authorid/56554219800); e-mail kutkin.yo@misis.ru

Поступила в редакцию 08.10.2024
Поступила после рецензирования 05.11.2024
Принята к публикации 08.11.2024

Received 08.10.2024
Revised 05.11.2024
Accepted 08.11.2024