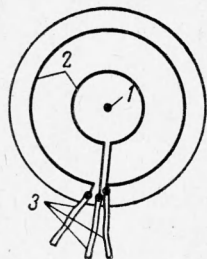


## СКОРОСТЬ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД

В. А. Лагунов, Ш. А. Мамбетов

(Ленинград, Фрунзе)

Процесс развития естественных микро- и макротрещин среды является определяющим при разрушении горных пород взрывом. Поэтому изучение закономерностей движения трещин представляет большой интерес для общего развития теории разрушения горных пород и ее практических приложений. Экспериментальное выяснение указанных закономерностей связано со значительными методическими трудностями регистрации высокой скорости развития трещин в хрупких средах. Этим обстоятельством, по-видимому, и объясняется относительно малое количество экспериментальных работ в этой области, выполненных на ограниченном круге материалов.



Фиг. 1. Образец с нанесенными сигнальными слоями аквадага: 1 — место удара, 2 — слой аквадага, 3 — контактные выводы из алюминиевой фольги

В настоящее время можно считать установленным в общих чертах качественный характер развития трещин в твердых телах [1-9]. Смекаль [1] впервые доказал неравномерность развития трещин в стекле, установив существование двух фаз: фазы ускоренного роста трещины и фазы стационарного движения ее с постоянной скоростью. По Смекалю, на нестационарном, коротком по длине, участке ускорение трещины определяется тепловыми флуктуациями и скоростью нарастания действующего напряжения. Скорость же развития трещин на втором этапе, согласно Смекалю, не зависит от приложенного напряжения и определяется лишь свойствами среды.

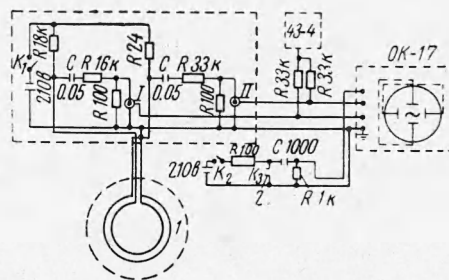
В работах [2,3] показано, что трещины в хрупких средах (стекле [2,3], канифоли [3]) распространяются с характерной для них скоростью, не зависящей от среднего напряжения, лишь при условии достижения некоторого предельного напряженного состояния, обеспечивающего максимальную скорость разрушения. По данным работы [3], такое состояние реализуется в хрупких средах при напряжениях, превышающих примерно 0.1 от их технической прочности. При разрушении не вполне хрупких материалов, например полимеров, когда наблюдается относительно низкая (по сравнению со скоростью распространения упругих волн) скорость роста трещин, зависимость ее от напряжения имеет место и при более высоких напряжениях, чем 0.1 технической прочности на разрыв [4,5].

Кинетика развития трещин в большинстве работ [1-6] исследовалась на таких однородных материалах, как силикатное стекло, канифоль, органическое стекло и некоторые другие полимеры, прозрачность которых обуславливает проведение надежных и хорошо повторяемых измерений. Для таких неоднородных и непрозрачных материалов, как горная порода, процесс трещинообразования исследован значительно слабее.

В работах [7-9] изучен процесс развития трещин на негабаритных блоках известняка и эквивалентных материалах, но ввиду ряда недостатков примененные в них методы исследования не годятся для серийных испытаний образцов пород.

В настоящей работе, поставленной с целью выявления корреляционной связи скорости развития трещин с физико-механическими постоянными пород, измерение указанной скорости проведено на образцах 13 горных пород с сильно различающимися свойствами.

Методика исследования основана на нанесении на поверхность образца, подлежащего разрушению, концентрических токопроводящих слоев и последующем осциллографировании моментов разрыва этих слоев движущейся трещиной (фиг. 1). Для измерения интервалов времени между разрывами использовался импульсный двухлучевой осциллограф ОК-17, позволяющий фиксировать интервалы времени длительностью до 10 мксек и менее, чего нельзя добиться, применяя шлейфовый осциллограф МПО-2 [7]. Прохождение трещины через две фиксированные точки на образце вызывало два последовательных электрических импульса, которые подавались на два независимых входа осциллографа. Фотографируя развертку и зная расстояние между токопроводящими слоями, можно вычислить время пробега трещины, а следовательно, и рассчитать среднюю скорость ее прорастания.



Фиг. 2. Принципиальная схема установки по за- меру скорости роста трещин при ударе; 1 — об- разец, 2 — мишень

Возбуждение трещин производилось двумя способами: ударом бойка с высокой скоростью и подрывом заряда тэна. Принципиальная схема установки по замеру скорости трещин при ударе показана на фиг. 2. В состоянии готовности при замкнутых ключах  $K_1$  и  $K_2$  в проводящих слоях течет постоянный ток, а конденсатор  $C_{1000}$  находится в заряженном состоянии. Запуск развертки осциллографа производится в момент замыкания бойком мишени 2, устанавливаемой в непосредственной близости от образца. Электрические импульсы, возникающие на проводящих кольцах при их разрыве вершиной трещины, через разделительные конденсаторы и делители напряжения подаются на соответствующие каналы осциллографа. На эти же каналы с частотомера ЧЗ-4 снимаются калиброванные метки времени в виде коротких по длительности импульсов с интервалами между ними 10 мксек (фиг. 3). Одновременная регистрация сигнальных импульсов и меток времени позволила исключить ошибки, связанные с некоторой несинхронностью лучей осциллографа, и значительно повысить точность измерения времени, которая в опытах с ударом бойка была не хуже 5%.

При отработке методики исследования, которая проводилась на стеклянных пластинах размером  $160 \times 160 \times 10$  мм<sup>3</sup>, в качестве токопроводящих слоев были опробованы напыленный алюминиевый слой, наклеенные кольца из константановой проволоки, графитовый слой (след мягкого карандаша) и слой аквадага (слой, образующийся после испарения воды из нанесенной на поверхность образца водной суспензии графита). Наилучшие и хорошо воспроизводимые результаты были достигнуты с напыленным слоем и слоем аквадага. Полученная этими двумя способами величина скорости трещин для стекла оказалась одинаковой и равной 1500 м/сек, что находится в хорошем согласии с данными других авторов [1-3, 6].

Эти опыты показали возможность замера скорости роста трещин при использовании в качестве проводящего слоя аквадага. Преимущество аквадага перед обычно применяемыми напыленным алюминиевым слоем [2] и наклеенными проволочными кольцами [7] заключается, во-первых, в простоте и возможности нанесения на любую поверхность испытываемых образцов, что позволяет широко применять данную методику исследований в разнообразных условиях; во-вторых, в практически полном отсутствии пластических деформаций слоя при прохождении через него прорастающей трещины и, наконец, в том, что нанесение аквадага, не требующее особых приемов обработки образцов, не вызывает каких-либо изменений свойств исследуемой породы, например влажности, которые могут сказаться на результатах измерения (при напылении, проводимом в условиях вакуумирования образцов, влажность породы существенно снижается).

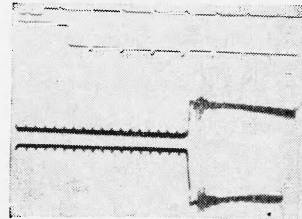
Опыты с горными породами проводились в ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР на образцах с размерами 70—100 мм по диаметру и 10—12 мм по высоте.

Основная часть результатов была получена при ударе мягкого бойка со скоростью 830 м/сек. Эти результаты приведены в табл. 1, где  $\kappa$  — коэффициент крепости по М. М. Протоdjяконову,  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>,  $C$  — скорость распространения продольных волн, м/сек,  $V$  — скорость развития трещин, м/сек.

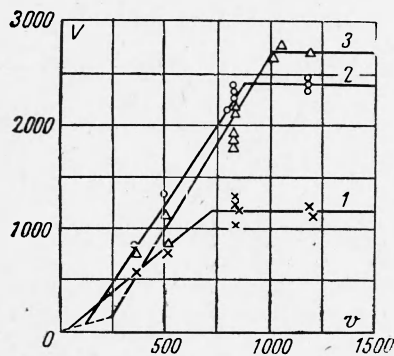
Для трех характерных пород в табл. 2 приведены скорость развития трещин  $V$ , замеренная при различных скоростях удара  $U$ , и скорость  $V$  — при взрыве зарядов тэна 0.5 г с размерами  $l = 10$  мм,  $d = 5$  мм и весом 0.5 г.

При работе с подрывом заряда тэна была изменена лишь схема синхронизации развертки осциллографа, запуск которой производился импульсом, подаваемым к запалу. При этом из-за большого разброса времени срабатывания заряда точность измерений была несколько снижена по сравнению со случаем удара бойком и составляла 10—15%.

Результаты испытаний показывают, что скорость развития трещин для испытываемых пород колеблется в пределах от 1000 до 2700 м/сек, что составляет 0,34—0,51 от скорости распространения продольных волн.



Фиг. 3. Примеры осциллограммы (вверху — случай удара, внизу — случай подрыва заряда тэна)



Фиг. 4. Зависимость скорости развития трещины  $V$ , м/сек, от скорости удара  $v$ , м/сек, в серпентините 1, сланце 2 и известняке 3

На фиг. 4 представлены зависимости скорости развития трещины от интенсивности внешнего воздействия (скорости удара) для серпентинита, известняка и сланца, аналогичные наблюдавшимся ранее в стекле [2,3] и канифоли [3]. По данным фиг. 4, ско-

Таблица 1

Наименование пород	$\kappa$	$\rho$	$C$	$V$	$V/C$
Серпентинит	3	2430	3200	1180	0.37
Известняк	10	2670	5750	2150	0.38
Известняк	10	2690	5350	2000	0.37
Диабазовый порфирит	13	2640	5040	1830	0.36
Сланец	13	2650	4850	2250	0.46
Измененный туф	20	2530	4740	1870	0.40
Парагнейс	14	2640	4700	2400	0.51
Диоритовый порфирит	16	2750	5040	1850	0.37
Андезит	20	2710	5620	2500	0.44
Листвинит	13	2700	5950	2050	0.35
Песчаник	20	2630	5220	1940	0.37
Роговик	20	2590	6150	2070	0.34
Гнейсовидный сланец	20	2930	5650	2700	0.48

рость развития трещины как в серпентините, так и в сланце достигает своего предельного значения при скорости удара 600—800 м / сек. Есть основания считать, что и в других исследованных в работе породах скорость распространения трещины, измеренная при ударе со скоростью 830 м / сек, является максимальной для данной породы или, во всяком случае, близкой к ней и что, следовательно, эту скорость можно рассматривать как одну из характеристик породы для оценки склонности ее к хрупкому разрушению.

Таблица 2

Наименование пород	$V$	$v$			
		1200	830	500	350
Серпентинит	1215	1140	1180	815	570
Известняк	2320	2700	2150	850	790
Сланец	2500	2400	2250	1350	810

Полученные в настоящей работе результаты, строго говоря, характеризуют скорость разрушения, распространяющегося по свободной поверхности предварительно ненагруженных малых по размеру образцов. В наиболее интересном для практики случае разрушения массива породы в силу ряда причин (из-за возможностей неэквивалентности скорости развития глубинных и поверхностных трещин, наличия неоднородных, как правило, сжимающих напряжений внутри массива, отсутствия влияния в нем отраженных от свободных поверхностей упругих волн и т. п.) закономерности развития трещин могут быть иными, чем при разрушении малых образцов.

Можно предполагать, что перечисленные выше причины в основном должны приводить к повышению предельной величины интенсивности внешнего воздействия, выше которой скорость разрушения не меняется, не сказываясь существенно на величине предельной скорости роста трещин. Однако более определенно о влиянии указанных факторов можно будет судить лишь после постановки специальных опытов, в первую очередь — опытов по измерению скорости роста трещин на крупногабаритных блоках породы. Предложенный в работе метод измерения скорости роста трещин с применением в качестве сигнального слоя аквадагового покрытия представляется для этих целей весьма перспективным.

Поступила 16 III 1965

## ЛИТЕРАТУРА

1. S m e k a l A. G. Dynamik des spröden zugbruches von zylindrischen Glasstäben. Acta Phys. Austriaca, 1953, vol. 7, No 1.
2. L u n d b o r g N., J o h a n s s o n C. H. Experimental determination of the speed of propagation of cracks in glass as a function of the stress. Arkiv Fys., 1952, vol. 4, No 39.

3. Кузьмин Е. А., Пух В. П. Скорость роста хрупкой трещины в стекле и канифоли. Сб. «Некоторые проблемы прочности твердого тела», Изд-во АН СССР, 1959.
4. Регель В. Р. К вопросу о кинетике роста трещин в процессе разрушения твердых тел. Ж. техн. физ., 1956, т. 26, № 2.
5. Журков С. Н., Томашевский Э. Е. Микроскопическое изучение роста трещин при взрыве. Ж. техн. физ., 1957, т. 27, № 6.
6. Schardin H. Ergebnisse der kinematographischen Untersuchung des Glasbruchvorganges. Glastechn. Ber., 1950, vol. 23, No 2.
7. Гаек Ю. В., Друкованный М. Ф., Мишин В. В. О скорости развития трещин в горных породах и твердых телах и методы ее измерения, Сб. «Взрывное дело», 1963, № 51/8.
8. Данчев П. С., Пучков Я. М., Ветлужских В. П. О скорости распространения трещин в прочной среде при взрыве. Тр. Ин-та горн. дела «Вопросы разрушения горных пород взрывом», Свердловск, 1963.
9. Турута Н. У., Миронов П. С. Изучение влияния массовых взрывов на устойчивость бортов карьеров. Научн. зап. Укр. НИИПроекта, 1961, вып. 6.

## ОБ АНИЗОТРОПНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛОВ

О. В. Соснин (Новосибирск)

Показано, что прокатанный в лист толщиной 20 мм дюраль ведет себя при снятии обычной диаграммы  $\sigma - \epsilon$  как изотропный материал в упругой и пластической областях при разных температурах, в то же время при определении характеристик ползучести обнаруживает существенную анизотропию.

В статье [1] дан краткий обзор состояния работ по анизотропной ползучести металлических и неметаллических материалов, и, при использовании идей, развитых в теории пластичности, показаны некоторые возможности описания анизотропной ползучести с применением теоретических результатов к обработке экспериментов на ползучесть стеклопластиков. В настоящей работе, как и в [2], эти исследования проведены в приложении к установившейся анизотропной ползучести типа теории течения.

1. Для снятия диаграммы  $\sigma - \epsilon$  из листа вырезались заготовки вдоль прокатки, поперек прокатки и под углом  $45^\circ$  в плоскости листа, из которых изготавливались образцы с длиной рабочей части 50 мм и диаметром 12 мм — для растяжения и 8 мм — для сжатия. Диаграмма снималась при различной фиксированной температуре, показания абсолютного удлинения и непрерывно возрастающего усилия при сжатии с микронных индикаторов фиксировались на киноленту и затем обрабатывались, при растяжении нагрузка осуществлялась ступенями посредством грузов, а показания индикаторов на удлинение снимались визуально. Весь процесс при снятии диаграммы на сжатие не превосходил 10 сек, при растяжении — 30—35 сек. После снятия диаграммы замерялось поперечное сечение образца — практически никакой овальности в сечении не наблюдалось. На фиг. 1 представлены снятые диаграммы  $\sigma - \epsilon$ , где опытные данные на сжатие образцов, вырезанных из листа вдоль прокатки, поперек прокатки и под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки, обозначены соответственно темными кружками, светлыми треугольниками. Крестиками обозначены данные на растяжение образцов в поперечном направлении. Все кривые идут в довольно узком пучке не только в упругой, но и в пластической областях, из чего можно заключить, что материал в смысле упруго-пластических характеристик изотропен.

Совершенно другая картина наблюдается в процессе ползучести. Эксперименты на ползучесть при растяжении проводились на образцах той же формы и вырезанных в тех же направлениях из листа. В процессе эксперимента замерялись осевое удлинение и изменение величины диаметров в двух направлениях, причем одно из них всегда выбиралось в направлении нормали к плоскости листа, другое — ему перпендикулярно. Для замера поперечных деформаций вокруг нагревательной печи на упругой подвеске крепилось кольцо из сплава инвар, на котором по взаимно перпендикулярным диаметрам устанавливались четыре микронных индикатора. Изменение поперечных размеров образца при ползучести через кварцевые стержни передавалось на эти индикаторы и фиксировалось кинокамерой или визуально.

Эксперименты проводились при  $200^\circ\text{C}$  в интервале нагрузок от 6 до 10 кг/мм<sup>2</sup>, когда первый участок на диаграммах ползучести практически не наблюдается. В процессе ползучести нагрузка либо оставалась постоянной, либо менялась ступенчато — и в том, и другом случае скорости ползучести, соответствующие одним и тем же напряжениям, совпадали, а отклонение скорости ползучести от постоянной величины при