Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVII, вып. 1, 1969 г.

УДАРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА ИЗГИБ

Л. С. Бурштейн

Во всех реальных телах процессы деформации протекают во времени. Механические характеристики, которые не учитывают времени, являются приближенными и во многих случаях оказываются недостаточными. Такие факторы, как скорость и продолжительность нагружения, энергия, накопленная системой, оказывают большое влияние на значение разрушающего напряжения [1, 10, 11]. В ЛГИ проведена большая работа по установлению физических особенностей процесса разрушения пород ударной нагрузкой и выяснению сравнительной эффективности статического и динамического способов разрушения [2, 3, 8, 9, 12, 13]. В результате установлено, что энергия разрушения, при прочих равных условиях, является функцией энергии удара, скорости приложения ударной нагрузки, массы ударяющего тела. Что касается сопоставления затрат энергии при статических и ударных испытаниях, то оно допустимо только при сравнимой степени дробления, т. е. при некоторой минимальной работе удара.

Испытания на удар применяют для определения вязкости материалов, т. е. способности его поглощать энергию при пластической деформации. При этом высокой вязкостью обладает материал, имеющий высокую прочность наряду с большой пластичностью. Хрупкие материалы имеют низкую вязкость, так как они разрушаются при малой остаточной деформации.

Испытание на удар на современном маятниковом копре в его обычном исполнении позволяет просто и быстро определять работу, необходимую для разрушения образца. Вместе с тем ударная вязкость, определенная по этой работе, оставляет много вопросов открытыми. Обычный маятниковый копер измеряет только суммарную работу, необходимую для разрушения образца, без каких-либо указаний о величинах деформации и нагрузки. Как известно, энергия, расходуемая маятником при ударе, состоит из: 1) энергии, затрачиваемой непосредственно на разрушение образца; 2) потерь, связанных с вибрацией фундамента и маятника; 3) энергии, уносимой разлетающимися частями образца.

Для аналитического определения отношения энергии, затраченной на разрушение образца, к полной энергии, израсходованной маятником, заменим систему, состоящую из копра и образца, упругой системой из двух вертикально расположенных и последовательно соединенных пружин. Падающий груз (маятник) ударяет по буртику, соединенному с нижней пружиной. При этом приняты следующие допущения: обе пружины упруги и невесомы; перемещение пружин мало по сравнению с высотой падения груза. Предполагается также, что потери

через фундамент отсутствуют. Обозначим прогибы пружин и их жесткости для копра и образца соответственно $Y_м$, Y_s и $K_м$, K_s. Тогда сила удара, возникающая при падении груза, будет

$$P=K_м Y_м=K_s Y_s=k(Y_м+Y_s), \tag{1}$$

где k—жесткость всей системы.

Полная энергия, отдаваемая маятником пружинам при максимальной деформации образца, составляет

$$U_0=U_s+U_м=\frac{1}{2}K_м Y_м^2+\frac{1}{2}K_s Y_s^2=\frac{1}{2}k(Y_{м_1}+Y_{s_1}), \tag{2}$$

где $Y_{м_1}$ и Y_{s_1}—максимальные прогибы.

Это выражение справедливо для неразрушенного образца или для разрушенного при условии, что энергия, уносимая разлетающимися частями, равна нулю. Из уравнений (1) и (2) получаем

$$\frac{U_s}{U_0}=\frac{K_s Y_{s_1}^2}{k(Y_{м_1}+Y_{s_1})^2}=\frac{K_s k^2}{kK_s^2}=\frac{k}{K_s}. \tag{3}$$

Из уравнения (1) имеем $k=\frac{K_s K_м}{K_м+K_s}$.

После подстановки в (3) находим

$$\frac{U_s}{U_0}=\frac{K_м}{K_м+K_s}. \tag{4}$$

Учитывая, что

$$K_s=\frac{P}{Y_s},$$

$$Y_s=\frac{Pl^3}{48EJ}\left(1+\frac{3h^2}{l^2}\right),$$

получаем

$$K_s=\frac{48EJ}{l^3\left(1+\frac{3h^2}{l^2}\right)}, \tag{5}$$

где E—модуль Юнга; J—момент инерции сечения;
l—длина балки; h—высота сечения.

Уравнение движения для рассматриваемой системы имеет вид

$$M\frac{d^2y}{dt^2}\cdot\frac{Md^2y}{dt^2}+ky=0, \tag{6}$$

где M—масса маятника.

Решение уравнения (6)

$$y=A\sin\sqrt{\frac{k}{M}}t+B\cos\sqrt{\frac{k}{M}}t. \tag{7}$$

Постоянные A и B в уравнении (7) определяются из начальных условий при $t=0$, $y=0$ и $\frac{dy}{dt}=v_0$, откуда получаем

$$y=v_0\sqrt{\frac{M}{k}}\sin\sqrt{\frac{k}{M}}t. \tag{8}$$

Наибольшее значение y достигает при $\sin\sqrt{\frac{k}{M}}t=1$ или $\sqrt{\frac{k}{M}}t=\frac{\pi}{2}$, откуда

$$y=v_0\sqrt{\frac{M}{k}}. \tag{9}$$

При этом сила удара равна

$$P_0=ky=v_0\sqrt{Mk}. \tag{10}$$

Из уравнения (4) видно, что только часть энергии тратится на разрушение образца, остальная же расходуется на деформацию элементов копра. Большие потери вызываются выбрациями стержня, возникающими при ударе, которые поглощают значительную часть энергии и не имеют непосредственного отношения к разрушению образца.

Наряду с колебаниями стержня маятника имеются также другие колебания, заслуживающие внимания. При ударе по образцу ударяющая масса вместе с пружинящей массой образца образует колебательную систему, в которой возникают собственные колебания. Вследствие этого разрушающая нагрузка не возрастает плавно, а сопровождается многочисленными, медленно затухающими колебаниями, которые вызывают дополнительный расход энергии, обусловленный внутренним трением в материале. Связанные с этим потери вызывают добавочное торможение маятника, благодаря чему измеренная работа больше затраченной непосредственно на разрушение материала. Чем тяжелее маятник, тем меньше собственная его частота и, следовательно, меньше возможное число колебаний до момента разрушения. Легкий маятник, наоборот, создает более быстрые колебания. Значит дополнительные потери, вызванные собственными колебаниями маятника, тем больше, чем легче маятник.

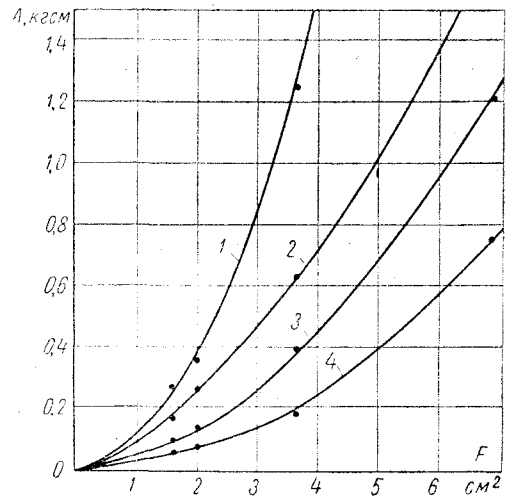


Рис. 1. Работа деформации при статическом нагружении. Площади сечения образцов $F=$ $=1{,}6$; 2,0; 3,6 и 6,8 $см^2$:

1—змеевик; *2*—песчаник; *3*—сланец; *4*—мрамор.

Наиболее простым способом оценки потерь опытным путем в маятниковом копре является сравнение работ деформации при статическом и ударном разрушениях одной и той же породы. Первые определяются по диаграмме деформации при статическом нагружении, вторые по показаниям маятника при ударе. Показания маятника в десятки раз превышают значения, полученные при статическом разрушении, так как у образцов горных пород энергия деформации весьма мала, а потери энергии составляют величину большого порядка. При испытании горных пород погрешность определения работы деформации настолько значительна, что не позволяет получить даже представление о действительной величине энергии, израсходованной непосредственно на разрушение.

Из рис. 1 видно, что работа деформации, отнесенная к единице площади, не является величиной постоянной, а растет с увеличением площади. Для сравнения с работой деформации, полученной на обычном маятниковом копре, была испытана на удар партия образцов размером $10\times20\times60$ *мм*. Как видно из табл. 1, действительная энергия, поглощенная образцом при разрушении, составляет от 3 до 5% величины, показываемой маятником.

Теоретические и экспериментальные исследования маятниковых копров обычной конструкции показывают, что наряду с хорошо известными преимуществами, эти копры обладают серьезными недостатками, основными из которых являются различные потери, связанные

с отбрасыванием разрушенных частей, потерями в самом копре, а также из-за гибкости стержня маятника и возникающих благодаря этому вибраций. Эти недостатки не столь существенны и не имеют решающего значения при испытании металлов, обладающих большой ударной вязкостью. При испытании же горных пород на удар они имеют столь большое значение, что сводят практически на нет полученные результаты. Кроме того, обычные маятниковые копры регистрируют только работу деформации, что недостаточно для характеристики материала. Все эти обстоятельства обусловили стремление конструкторов как к совершенствованию, так и к созданию новых конструкций маятниковых копров.

Таблица 1

Энергия деформации при разрушении, *кг·см/см²*

Породы	Число образцов	Статические испытания	Число образцов	Ударные испытания
Песчаник . . .	8	0,13	5	2,65
Сланец	6	0,07	7	1,70
Мрамор . . .	10	0,04	6	1,35
„Змеевик" . .	7	0,18	6	3,75

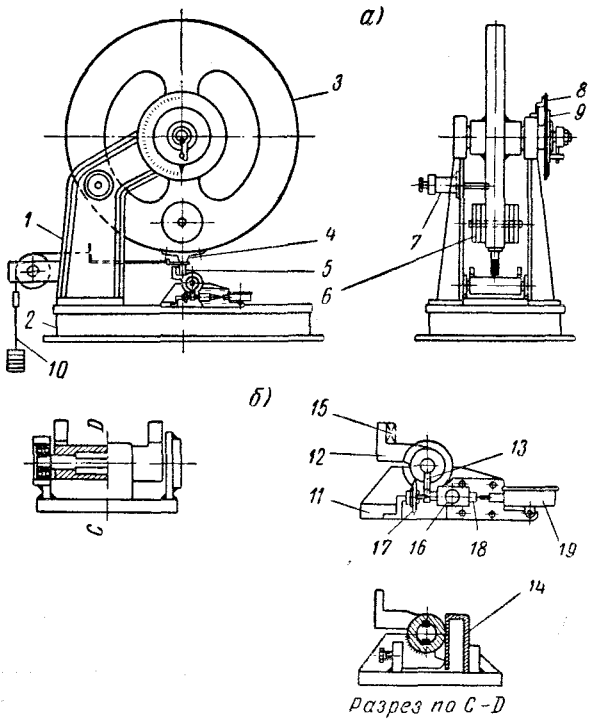


Рис. 2. Копер *а* и динамометр *б* для испытания горных пород на удар:

1—стойка; *2*—плита; *3*—инерционный диск; *4*—боек; *5*—испытуемый образец; *6*—груз; *7*—устройство для установки дисков в различных положениях; *8*—неподвижный диск; *9*—поворотный диск; *10*—тарировочное устройство; *11*—корпус; *12*—поворотная опора; *13*—рычаг; *14*—пружина; *15*—испытуемый образец; *16*—цилиндр; *17*—измерительный диск; *18*—разрезная втулка; *19*—индикатор.

Автором разработана и осуществлена конструкция копра (рис. 2), в котором указанные недостатки обычных маятниковых копров сведены к минимуму [4—7]. В копре ЛГИ скорость при ударе меньше, чем в стандартных копрах, благодаря чему энергия, уносимая разлетающимися частями, ничтожна. Отсутствие маятника в виде длинного тонкого стержня с грузом на конце исключает значительные потери энергии, характерные для копров Шарпи. Благодаря этому регистрируемая при ударе затрата энергии на разрушение образца близка к действительной.

Наряду с работой деформации при испытании регистрируется также максимальное усилие, возникающее при ударе. Устройство для изме-

рения этой величины несравненно проще, чем устройство, необходимое для получения полной диаграммы „сила—деформация" и может быть использовано в обычных производственных условиях. Вместе с тем наличие этой характеристики позволяет гораздо полнее оценить действительные свойства материала и получить приближенное представление о диаграмме „сила—деформация", особенно для хрупких материалов, следующих закону Гука вплоть до разрушения. Тарировочное устройство может быть использовано для статических испытаний образцов с целью сравнения с динамическими результатами. Для более детального исследования процесса удара к копру присоединен шлейфный осциллограф, усилитель и звуковой генератор. На осциллограмме одновременно регистрируется время, усилие и деформация образца. Датчиками усилий и деформаций служат тензометры омического сопротивления. Датчик для измерения усилия наклеен на тыльной стороне бойка, а для измерения деформаций датчики наклеиваются непосредственно на образец.

Для определения усилия, возникающего при ударе, производится предварительная тарировка динамометра. Тарировочное устройство при помощи рычага с отношением плеч 5:1 передает нагрузку на пружину динамометра через боек маятника.

Копер используется и для статических испытаний. Образец в этом случае нагружается с помощью тарировочного устройства. Преимуществом такого метода испытаний является то, что форма бойка, условия его соприкосновения с образцом, положение балочки на опорах остаются неизменными при динамических и статических испытаниях. В первом случае нагрузка передается на этот же маятник статически путем постепенного нагружения рычажным устройством. Для повышения точности исследования при статических испытаниях применялась та же электроизмерительная аппаратура, что и при динамических. Оба процесса регистрировались одним и тем же осциллографом. Ввиду того, что фактор времени играет существенную роль в этих испытаниях процесс статического нагружения регистрировался на пленку. Таким образом по осциллограмме статического испытания устанавливалась скорость нарастания нагрузки для любой ступени, длительность ее действия до перехода к следующей ступени и соответствующие этому процессу изменения деформации.

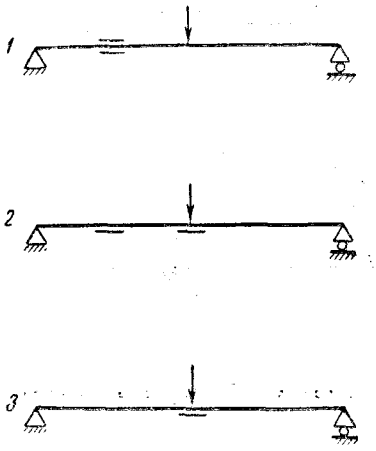


Рис. 3. Схемы наклейки тензометров.

Образцы для статических испытаний изготовлялись из того же материала, что и для динамических. Размеры образцов также брались одинаковыми. Для части длинных образцов (l=150 *мм* и больше) сперва одно сечение доводилось до разрушения статически, а затем оставшийся обломок образца доводился до разрушения в другом сечении динамически. Тензометры наклеивались так, чтобы имелась возможность регистрации как статического, так и динамического процессов. Вначале нагружение производилось до половины разрушающего напряжения, затем происходила разгрузка, после чего цикл повторялся. В следующем испытании образец доводился до разрушения. В тех случаях, когда образец разрушался только один раз (в одном сечении), применялись схемы наклейки тензометров, показанные на рис. 3.

По схеме *1* строились диаграммы σ—ε для напряжений меньше или равных половине разрушающего напряжения, по которым сопоставлялся характер кривых для растяжения и сжатия, после чего определялся предел прочности. По схемам *2* и *3* исследовались деформации только на растянутой стороне образца. Схема *2* позволяет построение диаграммы σ—ε для одного или больше циклов нагружения при напряжениях до 50% от разрушающего, а также диаграммы растяжения до момента разрушения. По схеме *3* исследуется только опасное сечение.

Для определения цены деления при измерении деформации к соответствующим тензодатчикам параллельно присоединялись градуированные сопротивления так, что общее сопротивление изменялось согласно формуле

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}.$$

Так определяется изменение сопротивления ΔR и соответствующая ему деформация. Зависимость между перемещением луча на осциллографе и значением ε, как правило, линейная.

Для измерения усилия, возникающего при ударе, датчик приклеивался непосредственно к бойку, на тыльной его стороне. Усилие градуировалось тарировочным приспособлением путем навешивания определенного груза. По полученным значениям ε можно вычислить стрелу прогиба

$$f=\frac{Pl^3}{48EJ}=\frac{Pl^3}{24EWh},$$

где W—момент сопротивления сечения, $W=\frac{bh^2}{6}$;

b—ширина сечения.

Учитывая, что $\frac{Pl}{4W}=\sigma$, получим

$$f=\frac{\sigma l^2}{6Eh}=\frac{\varepsilon l^2}{6h}. \qquad (11)$$

Это выражение предполагает линейную зависимость между нагрузкой и прогибом, а также одинаковые значения модулей деформации при растяжении и сжатии.

Зная f, можно найти, исходя из указанных допущений, также величину работы деформации из выражения

$$U=\frac{Pf}{2}.$$

Выражая P через ε, имеем

$$P=\frac{48EJ}{l^3}f=\frac{2}{3}\frac{Eh^2b\varepsilon}{l}.$$

Отсюда

$$U=\frac{2}{3}\frac{Eh^2b\varepsilon}{l}\frac{\varepsilon l^2}{6h}=\frac{E\varepsilon^2bhl}{18}.$$

С учетом поправки на сдвиг получаем окончательно

$$U=\frac{E\varepsilon^2bhl}{18}\left(1+\frac{3h^2}{l^2}\right). \qquad (12)$$

Формула (12) позволяет сопоставить энергию, определенную по маятнику и вычисленную теоретически. Значение E для этой цели находится из опыта резонансным методом. Выражая E через P и ε, можно написать

$$U=\frac{Pl^2\varepsilon}{12h}\left(1+\frac{3h^2}{l^2}\right). \qquad (13)$$

Таблица 2

Результаты определения прочности при статическом и динамическом нагружениях

Порода	Размеры образцов, *мм*	Испытания						$\frac{\sigma_д}{\sigma_с}$
		статические			динамические при v=0,5 *м/сек*			
		число образцов	$\sigma_с$, *кг/см²*	коэффициент вариации, %	число образцов	$\sigma_д$, *кг/см²*	коэффициент вариации, %	
Сланец	8× 20×90	18	77	12,6	15	130	11,4	1,69
	10× 20×150	20	68	10,5	13	111	3,5	1,63
	12× 30×132	18	64	5,3	12	101	8,7	1,57
	17×140×172	16	72	9,7				
Мрамор	8×20×90	26	103	15,6	12	128	8,3	1,25
	10×20×90	18	92	3,4	14	119	4,8	1,30
	10×30×132	16	88	9,6	10	106	12,2	1,21
	15×42×172	16	85	11,8				
„Змеевик"	8×20×90	16	281	10,9	17	274	10,6	0,975
	10×22×150	20	259	2,7	9	286	7,2	1,10
	12×30×132	18	263	16,1	10	250	9,4	0,95
	18×40×172	15	275	8,8				
Песчаник	10×20×60	14	145	6,8	12	155	10,1	1,07
	20×20×90	12	158	10,1	10	144	8,9	0,92

Наибольшее превышение динамической прочности над статической наблюдается у сланца (табл. 2), являющегося наименее крепким среди испытанных пород и обладающего наибольшей пластичностью. В породе „змеевик", прочность которой в 3 раза превосходит прочность сланца, влияние динамического фактора почти не проявляется. Эти данные указывают на то, что и при сравнительно невысоких скоростях деформирования предел прочности слабых пород при динамическом нагружении может значительно превосходить соответствующие значения, полученные при статических испытаниях. Существующее представление о том, что динамический фактор является важным только при весьма высоких скоростях деформации, очевидно ограничивается твердыми породами.

Процесс удара на копре ЛГИ фиксируется на осциллограмме. Изменение силы удара на осциллограмме регистрируется в течение всего процесса удара, поскольку тензодатчик, предназначенный для этой цели, не подвергается разрушению в ходе испытаний. Тензометр, измеряющий деформацию, регистрирует процесс только до определенной нагрузки. Обработка таких осциллограмм дает возможность построить диаграммы $\sigma-\varepsilon$, $\varepsilon-t$ и $P-t$ (рис. 4). Измерения проводились двумя датчиками, наклеенными в среднем сечении, подвергающемся разрушению и, в промежуточном, остающемся невредимым (здесь изгибающий момент вдвое меньше). Диаграмма $\sigma-\varepsilon$ для промежуточного се-

чения представлена одной и той же прямой линией как при нагружении, так и при разгрузке. Датчик, измеряющий деформацию в среднем сечении, начал разрушаться после достижения наибольшей нагрузки и последующего ее падения до 80% от максимальной. Из диаграммы видно, что наибольшая часть общей деформации приходится на область понижающейся нагрузки. Диаграмма свидетельствует о сравнительно высокой пластичности этого сланца и связанной с нею большой работой деформации.

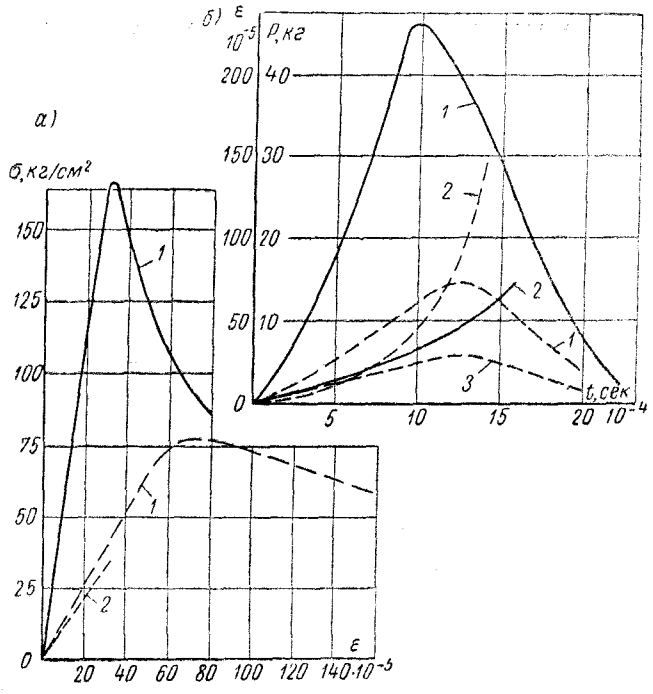


Рис. 4. Диаграммы σ—ε, ε—t и P—t для сланца (пунктир) и змеевика (сплошная):

а) *1*, *2*—деформации соответственно среднего и промежуточного сечений;
б) *1*—усилие; *2*, *3*—деформации соответственно среднего и промежуточного сечения.

В противоположность сланцу длительность нарастания нагрузки для змеевика значительно меньше длительности ее убывания ($0{,}97 \cdot 10^{-3}$ *сек* и $1{,}4 \cdot 10^{-3}$ *сек* соответственно). Кривая для змеевика интересна тем, что получена по показаниям датчика, разрушенного лишь после падения нагрузки до 0,5 от максимальной, ввиду чего диаграмма имеет более полное очертание. Нарастание нагрузки вплоть до максимальной происходит по линейному закону. Доля упругой деформации, равно как и работы упругой деформации, малы по сравнению с соответствующими полными их значениями.

На рис. 5 показаны результаты обработки осциллограммы испытания образца песчаника размерами $h=10$ *мм*, $b=20$ *мм* и $l=60$ *мм*. Датчики наклеены по схеме *1* (рис. 3). После разрушения образца оба датчика остаются невредимыми, что позволяет зарегистрировать диаграммы σ—ε на растянутой и сжатой сторонах. Зависимости при нагрузке и разгрузке практически одинаковы, так что на диаграмме трудно отделить их друг от друга. Диаграммы сжатого и растянутого волокон получаются различными, модуль деформации на всем протяжении при сжатии значительно больше, чем при растяжении. Из рис. 5,*б* видно, что нагрузочная часть кривых занимает больше времени, чем

разгрузочная, т. е. процесс разрушения среднего сечения после достижения максимальной нагрузки занимает в два раза меньше времени, чем процесс нарастания нагрузки (масштаб ε тот же, что на рис. 5*а*).

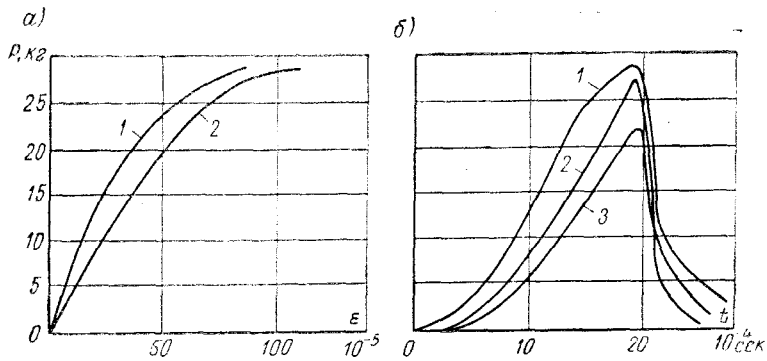


Рис. 5. Диаграммы P—ε *а* и ε—t и P—t *б* образца песчаника:
1—сжатие; *2*—растяжение; *3*—усилие.

Рассмотрение диаграмм P—t исследованных материалов показывает, что у менее пластичных материалов (змеевик) максимальная нагрузка достигается за меньший промежуток времени, чем у сланца, и, наоборот, время, нужное для полного разрушения сечения, после достижения максимальной нагрузки, у этих материалов больше, чем у более пластичных.

Выводы

Теоретически и экспериментально доказано, что ударные испытания горных пород на стандартных копрах типа Шарпи бесполезны, так как вследствие потерь энергии, связанных с колебательными процессами и другими факторами, результаты, получаемые при этих испытаниях, резко расходятся с действительностью.

Для ударных испытаний пород на изгиб нужен принципиально иной копер, типа конструкции ЛГИ, обеспечивающий благодаря низкой частоте колебаний маятника надежные результаты. Важным преимуществом этой конструкции является возможность записи диаграмм σ—ε, при помощи которых можно изучить закономерности поведения породы под ударной нагрузкой, вплоть до разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барон Л. И. Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород ударом. Изд-во АН СССР, 1962.

2. Берсенев В. С. Разрушение углей ударом. Зап. ЛГИ, т. XLI, вып. I, 1959.

3. Борисов А. А. Разрушение углей и горных пород ударной нагрузкой. В сб. „Расчет, конструирование и испытание горных машин", вып. 2. Углетехиздат, 1955.

4. Бурштейн Л. С. Испытания горных пород на удар. Мат-лы симпозиума „Эксперимент. исследования инж. сооружений", вып. 3, 1964.

5. Бурштейн Л. С. Копер для испытания образцов горных пород. Бюлл. Госкомитета по делам изобретений и открытий № 4, 1964.

6. Бурштейн Л. С. и др. Определение собственной частоты инерционного маятника с грузом при больших колебаниях. Зап. ЛГИ, т. XXXVIII, вып. 3, 1958.

7. Бурштейн Л. С. Диаграммы динамических напряжений некоторых горных пород. Доклад на Всесоюзном совещании по механике горных пород и горному давлению. Новосибирск, 1968.

8. Бубок В. К. Влияние энергии удара и угла поворота бура на скорость бурения машинами ударного действия. В сб. „Горное оборудование". Ртп. ин-та Гипроникель, 1959.
9. Геронтьев В. И., Кальницкий Я. Б., Берсенев В. С. Некоторые итоги исследования разрушения углей в массиве ударной нагрузкой. В сб. „Вопросы разрушения и давления горных пород". Углетехиздат, 1955.
10. Кузнецов Г. Н. Механические свойства горных пород. Углетехиздат, 1947.
11. Протодьяконов М. М., Тедер Р. И. Исследование процессов разрушения угля методом крупного скола. Ртп. ИГД им. Скочинского, 1960.
12. Тимофеев О. В. Исследование разрушения горных пород крупным сколом при ударном приложении нагрузки. Автореферат канд. диссертации ЛГИ, 1956.
13. Шамшев Ф. А., Бобровский Е. В. К проблеме буримости горных пород. ОНТИ, 1937.