Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 1, 1975 г.

КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ И ДИАГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

Доктор техн. наук *Л. С. Бурштейн*,
А. Н. Курочкин

(Ленинградский горный ин-т)

В общем комплексе вопросов по разрушению горных пород важное место занимает разработка теории прочности и совершенствование методов их испытания. В результате проведенных исследований возникли новые представления о свойствах пород и механизме их разрушения. В данной статье рассматривается вопрос о связи теории прочности с механизмом разрушения и приводятся методы построения диаграмм напряжений и их интерпретация.

При решении горнотехнических задач наибольшее распространение получила теория Мора, представляющая собой модификацию теории наибольших касательных напряжений, согласно которой плоскость разрушения, независимо от напряженного состояния, составляет с максимальным сжимающим напряжением угол 45°; свойства материала при растяжении и сжатии одинаковы. Горные породы не удовлетворяют этим условиям, поэтому теория наибольших касательных напряжений к ним неприменима.

Прочность горных пород зависит от напряженного состояния, она увеличивается с повышением бокового давления (рис. 1). Стрелки у образцов показывают в масштабе величину и направление напряжений при разрушении одной и той же породы. Линия на образце примерно показывает угол наклона плоскости разрушения.

Прочность пород на растяжение много меньше, чем прочность на сжатие, и плоскость разрушения образует с направлением наибольшего сжатия угол меньше 45°. Этот угол, как видно из рис. 1, повышается с увеличением бокового давления, поэтому теория наибольшего касательного напряжения не может быть использована для горных пород, испытывающих хрупкое разрушение.

Навье видоизменил теорию максимального касательного напряжения. Он предположил, что сопротивление сдвигу на плоскости разрушения не постоянно, а растет с повышением нормального напряжения σ на ней. Согласно Навье, разрушение происходит по плоскости, в которой касательное напряжение не максимально, а наиболее эффективно, и зависит от величины коэффициента внутреннего трения.

Для элемента, находящегося под действием напряжений σ_1 и σ_3 (рис. 2), на площадке под углом α возникают касательные напряжения

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \qquad (1)$$

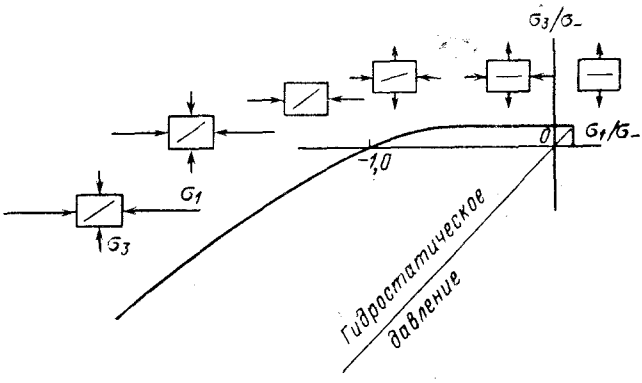


Рис. 1. Зависимость прочности горной породы от напряженного состояния: σ_- — прочность при одноосном сжатии, $\sigma_2 = \sigma_3$

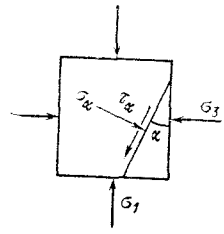


Рис. 2. Схема действия напряжений на выделенный элемент

и нормальные

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\cos 2\alpha. \qquad (2)$$

Нормальное напряжение σ_α снижает эффективность касательного при разрушении на величину $\mu\sigma_\alpha$, где μ — коэффициент внутреннего трения. Пусть τ'_α — наибольшее эффективное касательное напряжение. Тогда

$$\tau'_\alpha = \tau_\alpha - \mu\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin 2\alpha - \mu\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\cos 2\alpha\right).$$

Наибольшее эффективное касательное напряжение достигает максимума при $\frac{d\tau'_\alpha}{d\alpha} = 0$, т. е. когда

$$(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\alpha = \mu(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\alpha \text{ и } \operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\mu(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{1}{\mu}.$$

При $\mu = 0$ $\alpha = 45°$ и $135°$. Приняв $\mu = 0{,}5$, получим $\operatorname{tg} 2\alpha = 2$ и $\alpha = 31°45'$. Этот угол показывает наиболее эффективную плоскость сдвига. Положение другой аналогичной плоскости может быть определено по симметрии относительно главных напряжений.

Согласно теории Мора, угол наклона плоскости разрушения определяется по огибающей предельных кругов напряжений. Если согласно уравнению Кулона огибающая принята

$$|\tau_\alpha| = \tau_0 + \mu\sigma, \qquad (3)$$

где τ_0 — сцепление, то плоскость разрушения должна образовать с осью образца угол α, определяемый из условия

$$2\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi,$$

где φ — угол внутреннего трения породы.

Уравнение (3) может быть выражено через главные напряжения σ_1 и σ_3 следующим образом [6]:

$$\sigma_1\left(\mu + \sqrt{1+\mu^2}\right) + \sigma_3\left(\mu - \sqrt{1+\mu^2}\right) = 2\tau_0. \qquad (4)$$

Отношение прочности на сжатие к прочности на растяжение принимает форму

$$\frac{\sigma_-}{\sigma_+} = \frac{\mu + \sqrt{1+\mu^2}}{\mu - \sqrt{1+\mu^2}}, \tag{5}$$

где $\mu = \operatorname{tg}\varphi$.

В случае, когда огибающая Мора представлена двумя прямыми линиями, согласно формуле (3) между главными напряжениями существует простая зависимость

$$\sigma_1 = a + b\,\sigma_3, \tag{6}$$

где $a = 2\sqrt{b}\,\tau_0$; $b = \dfrac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$.

Таким образом, данные трехосных испытаний могут быть представлены либо в форме диаграммы Мора, либо в форме линейной зависимости между σ_1 и σ_3.

Важное значение огибающей Мора для оценки прочности пород впервые было установлено Карманом в результате классических опытов с песчаниками и мрамором при всестороннем давлении.

Теория Мора указывает значения главных напряжений в начале разрушения и наклон плоскости разрушения, но не дает значения главных напряжений при разрушении.

Огибающая Мора представляет собой способ, позволяющий сравнивать результаты различных испытаний. Этот метод оказался весьма эффективным и получил широкое распространение. Однако огибающую Мора не следует рассматривать как теорию прочности, так как она не устанавливает подобно общепринятым критериям прочности зависимость любого напряженного состояния от прочности на простое растяжение или сжатие. Теория Мора, равно как и другие технические теории, является феноменологической, поскольку не дает никаких сведений о механизме разрушения.

Среди других теорий особый интерес представляет теория Н. Н. Ставрогина, основанная на большом количестве испытаний горных пород*. Подобно теории Мора, она является феноменологической.

Механизм разрушения в широком смысле учитывает имеющиеся в теле трещины и закономерности их развития. Основу нового направления, основоположником которого является Гриффитс, составляет изучение процесса хрупкого разрушения в результате развития содержащихся в теле дефектов в виде трещин различной формы и размеров. Критерий Гриффитса выведен с использованием двух методов: рассмотрения энергетического баланса трещины и напряженного состояния вблизи края трещины.

Основная предпосылка энергетического метода состоит в том, что энергия, подводимая к телу при нагружении, превращается в энергию деформации, накопленную в материале, и в поверхностную энергию трещины. Критерий Гриффитса имеет вид

$$\sigma \geqslant \sqrt{2\gamma E/\pi c}, \tag{7}$$

где σ — приложенное напряжение, γ — поверхностная энергия единицы длины трещины, E — модуль упругости, c — полудлина трещины [7].

---

* А. Н. Ставрогин. Прочность и деформация горных пород. Автореф. дисс. ИГД им. А. А. Скочинского, 1969.

Второй метод основан на предположении, что наличие узкой трещины вызывает при нагружении большую концентрацию растягивающих напряжений по ее краям. Гриффитс определил зависимость между приложенным напряжением и растягивающим напряжением у края трещины, имеющей форму эллипса. При достижении растягивающим напряжением у края трещины критического значения трещина начинает увеличиваться. Для двухосного напряженного состояния критерий начала разрушения имеет вид

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\sigma_1 + \sigma_3} = -8\sigma_+, \text{ если } 3\sigma_1 + \sigma_3 < 0, \tag{8}$$

где σ_1 и σ_3 — соответственно, максимальные и минимальные значения приложенных главных напряжений; σ_+ — прочность материала на одноосное растяжение.

Если $3\sigma_1+\sigma_3>0$, разрушение начинается при $\sigma_1=\sigma_+$.

Вопросы разрушения хрупких тел в результате распространения трещин рассмотрены в работе Г. И. Баренблатта, который выдвинул новые расчетные схемы и гипотезы о характере сил взаимодействия между противоположными сторонами трещины в ее концевой части [1].

Анализ Гриффитса относится к открытой трещине и не указывает, как влияет закрытие трещины на растягивающее напряжение у ее края. Трещина закрывается, когда приложенные напряжения являются сжимающими. Модифицированная теория Гриффитса для случая закрытия трещин при сжатии вводит коэффициент внутреннего трения между поверхностями трещины [5]. Она включает две критические величины: критическое растягивающее напряжение у края трещины, выраженное через прочность на одноосное растяжение, и коэффициент внутреннего трения между поверхностями трещины.

Согласно этой теории разрушение наступает при условии

$$(\sigma_1 - \sigma_3)(1 + \mu^2)^{\frac{1}{2}} - \mu(\sigma_3 + \sigma_1 + 2\sigma_c) = 4\sigma_+\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_+}\right), \tag{9}$$

где μ — коэффициент трения на поверхностях трещины; σ_c — напряжение, необходимое для закрытия трещины.

Величина σ_c мала и приближенно ее можно считать равной нулю. При этом уравнение (9) принимает вид

$$(\sigma_1 - \sigma_3)(1 + \mu^2)^{\frac{1}{2}} - \mu(\sigma_3 + \sigma_1) = 4\sigma_+. \tag{10}$$

Обозначив прочность на одноосное сжатие σ_- и подставляя в формулу (10) $\sigma_-=-\sigma_3$ и $\sigma_1=0$, получим отношение прочности на простое сжатие к прочности на простое растяжение

$$\frac{\sigma_-}{\sigma_+} = \frac{4}{(1 + \mu^2)^{\frac{1}{2}} - \mu}. \tag{11}$$

Тогда модифицированное условие начала разрушения может быть написано так

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{\sqrt{1 + \mu^2} + \mu}{\sqrt{1 + \mu^2} - \mu} + \sigma_-. \tag{12}$$

Рассмотрим, в какой мере теорию Гриффитса можно применить к горным породам. В породе имеются весьма значительные дефекты

в виде кливажа, слоистости, пустот и т. д. Если их исключить, то следует принять во внимание дефекты, которые по размеру меньше или равны размеру зерна. Многочисленные наблюдения [6] показывают, что наиболее критическими являются границы зерен; при определенном уровне напряжений они становятся ослабленными. Непосредственно перед разрушением наблюдается большое количество ослаблений различной длины и ориентации. Дальнейший рост этих трещин приводит к полному разрушению.

Модифицированная теория Гриффитса предусматривает закрытие трещин в условиях сжатия и возникновение на их поверхностях сил трения. Наблюдения показывают, что в твердых породах ослабленные границы зерен перед разрушением находятся во фрикционном контакте. Что же касается слабых пород, то у них границы зерен могут с самого начала не находиться в контакте. Однако и в этих породах под

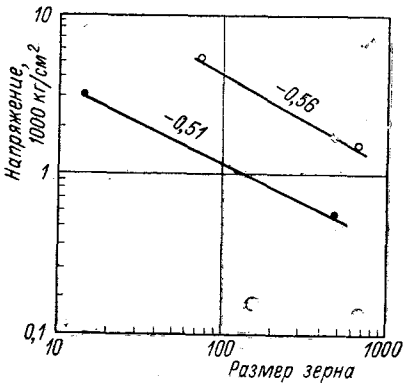


Рис. 3. Зависимость прочности от размера зерна [6]

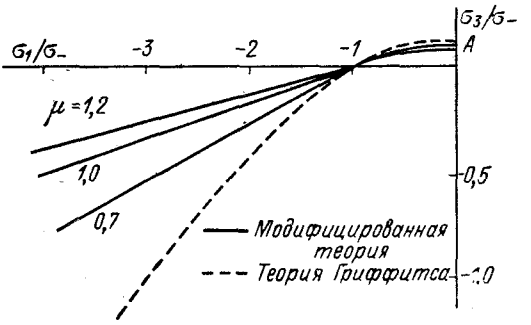


Рис. 4. Условия разрушения по Гриффитсу и модифицированной теории

влиянием бокового давления трещины на границах зерен приходят в соприкосновение.

Опыты, проведенные со многими породами, подтверждают применимость исходной формулы Гриффитса (7) к горным породам при испытании их на простое растяжение. Из этой формулы вытекает, что разрушающее напряжение обратно пропорционально квадратному корню от длины трещины. Из приведенной на рис. 3 зависимости прочности на растяжение карбонатных пород от размера зерна видно, что наклон —0,51 для мрамора и —0,56 для доломита хорошо согласуется с теоретическим значением —0,5. Это подтверждает правомерность применения теории Гриффитса к горным породам, с учетом того, что длина трещины $2c$ определяется максимальным размером зерна.

Условие разрушения согласно исходной теории Гриффитса имеет криволинейное очертание на всем протяжении, в модифицированной теории (12) условия разрушения представлены прямыми линиями, проходящими через точку —1,0 (рис. 4). Разрушение при простом растяжении происходит в точке A, при простом сжатии в точке —1,0.

Испытания силикатных пород и доломитов показали удовлетворительное совпадение опытных данных с модифицированной теорией.

Теория Гриффитса дает удовлетворительный критерий для начала разрушения. При определенных условиях начало разрушения и его конец могут совпадать, в этих случаях критерий Гриффитса практически определяет предел прочности материала. Многие материалы, к числу которых относятся горные породы, не удовлетворяют этому условию: между возникновением разрушения и его концом происходит

процесс распространения разрушения, вследствие чего предел прочности материала нельзя определять по критерию для возникновения разрушения.

Указанные соображения особенно существенны для разрушения в условиях сжатия, когда напряжение, необходимое для возникновения разрушения, значительно отличается от предела прочности. При сжатии, в отличие от растяжения, трещина не распространяется в собственной плоскости, для ее распространения требуются определенные условия. Поэтому критерий начала разрушения не может служить для определения прочности на сжатие.

Если к материалу приложено сжимающее напряжение, трещины, расположенные под углом к этому напряжению, закрываются. В результате закрытия трещин модуль упругости повышается. Этим и обусловлен нелинейный участок в начале кривой σ—ε. Для твердых пород этот участок весьма мал, т. е. большинство трещин закрыто до приложения нагрузки.

После закрытия трещин деформация становится упругой, зависимость σ—ε линейна и модуль E имеет постоянное значение. В течение этого процесса возможно некоторое трение между поверхностями закрытых трещин. Чтобы получить представление о возникающих явлениях, обратимся к опытам со стеклянными пластинками, в которых искусственно созданы наклонные трещины [5]. Если такую пластинку нагрузить сжимающими напряжениями, то вдоль длинной трещины образуются короткие, вызванные трением при относительном движении поверхностей трещины (рис. 5, *а*). Эти трещинки располагаются на равных расстояниях друг от друга и увеличиваются по мере роста нагрузки до тех пор, пока ближайшая к краю основной трещины не начнет разрушать пластину (рис. 5, *б*). С этого момента возникновение и рост коротких вертикальных трещинок прекращаются. Отсюда видно, что в течение процесса упругой деформации поверхности трещины скользят друг относительно друга, что сопровождается образованием малых вертикальных трещинок вдоль основной трещины.

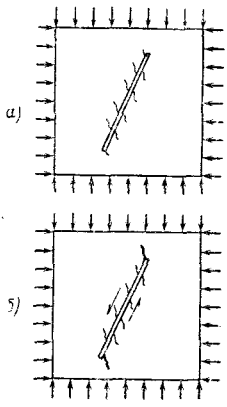


Рис. 5. Механизм скольжения поверхностей закрытой трещины

Вследствие неровностей поверхностей трещины сопротивление срезу (трению) по ее длине различно. В точках контакта неровности смещаются вплоть до среза. При достаточно высокой нагрузке срезаются все неровности и начинается движение одной поверхности трещины относительно другой. При этом по краям основной трещины растут короткие трещины, обуславливая таким образом начало разрушения.

Из опытов видно, что разрушение начинается вблизи края трещины и на некотором расстоянии от него. Таким образом, для закрытых трещин в условиях сжатия край трещины в процессе разрушения играет меньшую роль, чем в открытой трещине при растяжении.

При трехосном нагружении возможно такое соотношение $K=\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$, при котором разрушение может не наступать. При этом критическом значении K напряжение, необходимое для начала разрушения, становится бесконечным.

Если в уравнении (12) σ_3 заменить на $\frac{\sigma_1}{K}$, то получим

$$\sigma_1 = \sigma_- \frac{\sqrt{1+\mu^2}-\mu}{\sqrt{1+\mu^2}-\mu-\dfrac{\sqrt{1+\mu^2}+\mu}{K}}.$$

Для заданного значения μ напряжение, необходимое для начала разрушения, становится бесконечным, когда

$$\sqrt{1+\mu^2}-\mu=\frac{\sqrt{1+\mu^2}+\mu}{K} \quad \text{или} \quad K=\frac{\sqrt{1+\mu^2}+\mu}{\sqrt{1+\mu^2}-\mu}. \tag{13}$$

На рис. 6 показан постепенный переход от одноосного сжатия, когда разрушение начинается при наименьшем напряжении, до трехосного, при котором согласно формуле (13) разрушение не может возникнуть. Из рис. 6 видно, что механизм разрушения при сжатии в основном одинаковый при одно- и трехосном сжатии.

Диаграмма сжатия σ—ε для горных пород (рис. 7) может быть разделена на четыре района, каждый из которых соответствует определенному механизму деформации. В районе *I* трещины закрываются, свойства породы упругие, поэтому при разгрузке все деформации исчезают. Кривая продольной деформации σ—ε вогнута в сторону напряжений, кривизна ее для разных пород различна. Кривая σ—ε_1 поперечной деформации вогнута в противоположную сторону. С возрастанием нагрузки коэффициент Пуассона повышается.

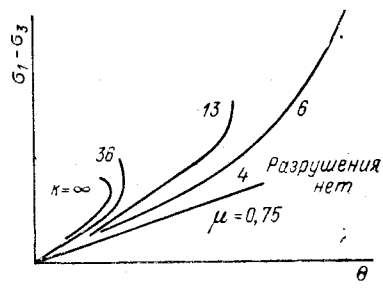


Рис. 6. Влияние бокового давления на разрушение породы при сжатии: θ — относительная объемная деформация [5]

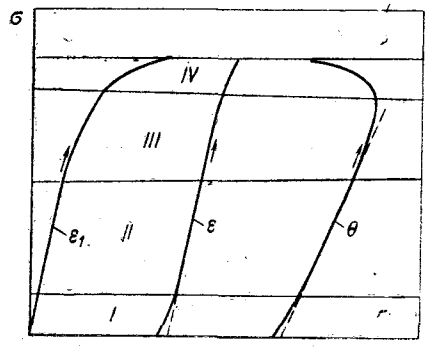


Рис. 7. Диаграммы продольной, поперечной и объемной деформации

В районе *II* порода становится упруго-устойчивой, модуль упругости и коэффициент Пуассона имеют постоянное значение. Отношение продольных и поперечных деформаций примерно одинаково. В конце района *II* наибольшее главное напряжение достигает критического значения, выше которого начинаются микроразрушения в наиболее напряженных точках.

Район *III* кривой σ—ε характеризуется непрерывным изменением микроскопического строения породы. Эти изменения происходят в результате растрескивания отдельных зерен и ослабления связей между ними. Поперечные деформации растут быстрее продольных. Если в районах *I* и *II* объем образца уменьшается, то в районе *III* он начинает увеличиваться, так как образуются микротрещины. В конце района *III* касательная к кривой σ—Θ меняет знак.

В районе *IV* кривой σ—ε поперечная деформация быстро нарастает и кажущийся коэффициент Пуассона приближается к большим значениям ($\nu \geqslant 0{,}50$). Если произвести разгрузку в районах *III* и *IV*, получится гистерезисная петля с некоторой остаточной деформацией.

Начало разрушения в породе определяется по кривой объемной деформации. Оно имеет место в точке, где указанная кривая отклоняется от прямой. В известной мере это проявляется на кривой поперечной деформации и совершенно не проявляется на кривой продольной деформации.

Деление кривой σ—ε по проявляемым свойствам на четыре района (стадии) общепринято и не вызывает возражений. Ясно также, что кривая σ—Θ в гораздо большей степени отражает изменения в поведении породы под нагрузкой, чем кривая σ—ε, позволяя, в частности, установить начало разрушения. Однако до сих пор не ясен механизм явлений, соответствующий указанным стадиям, и в первую очередь стадиям *III* и *IV*. Успехи, достигнутые на базе развития теории Гриффитса применительно к горным породам, побуждают некоторых исследователей [5] интерпретировать все наблюдаемые при испытании явления с позиций указанной теории. Согласно этим представлениям среди трещин выделяются критически ориентированные, от которых начинается разрушение образца. Ответственность за разрушение породы, в конечном счете, возлагается на одну наиболее опасную трещину.

В соответствии с этой теорией различают устойчивое и неустойчивое распространение трещин. Устойчивое распространение определяется величиной приложенной нагрузки. Неустойчивым считается развитие трещин, которое зависит не только от нагрузки, но и от других факторов и, следовательно, является неконтролируемым. В стадии *III* трещины распространяются устойчиво с малой скоростью.

Стадия *III* наступает, когда достигаются условия, соответствующие критерию Гриффитса, стадия *IV* (неустойчивое распространение трещин) наступает, когда выделяемая критическая энергия удовлетворяет критерию Ирвина. Это соответствует напряжению, равному примерно 80% от предела прочности.

Описанный выше механизм разрушения в стадиях *III* и *IV* интерпретируется исключительно на основании гипотезы Гриффитса об ответственности за разрушение единичной наиболее опасной трещины.

Однако в последнее время эта точка зрения встречает все большее возражение. Новая концепция заключается в том, что отдельные стадии на диаграмме σ—ε определяются не тем или иным развитием одиночной микротрещины, а процессом образования микротрещин в породе, их количеством и интенсивностью. Изменение объема пропорционально числу микротрещин, которые возникают при сравнительно низком давлении и распространяются по мере повышения напряжения.

Специальная радиотехническая аппаратура, регистрирующая импульсы, обусловленные возникновением трещин [8], позволяет сопоставить этот процесс с изменением объема образца. Полученные результаты показали, что изменение объема несомненно определяется интенсивностью образования микротрещин и что именно она характеризует четыре стадии диаграммы σ—Θ. Число импульсов от микроразрушений за единицу времени n зависит от нормальных напряжений σ для горных пород при сжатии (рис. 8): в стадии *I* трещины закрываются, связанное с этим число импульсов минимально; стадия *II* — область, в которой микроразрушения не наблюдаются; в стадии *III* количество микроразрушений увеличивается; стадия *IV* характеризуется возрастанием микроразрушающей активности.

Прямые наблюдения показывают, что между микроразрушениями в стадиях *III* и *IV* принципиальных различий нет. В обеих стадиях имеют место импульсы весьма высокой частоты, генерируемые быстро распространяющимися источниками. Различие между стадиями *III* и *IV* состоит, прежде всего, в резком увеличении интенсивности микроразрушений в стадии *IV*. Другое различие заключается в том, что

в стадии *III* микроразрушения расположены произвольно, независимо друг от друга, между тем как в стадии *IV* они группируются в определенном районе, создавая макроскопическую поверхность разрушения (рис. 9). Стадия *IV* начинается, когда плотность микроразрушений достигает критического уровня.

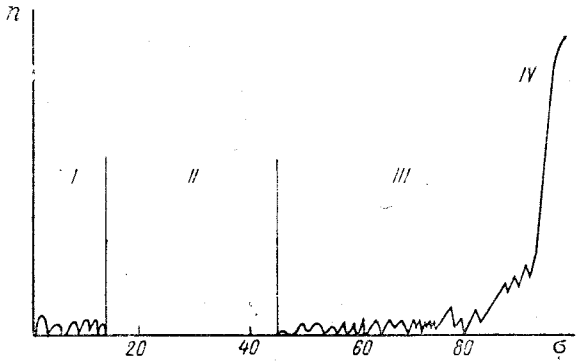


Рис. 8. Число импульсов в единицу времени в зависимости от напряжения

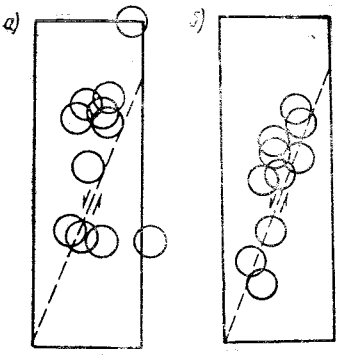


Рис. 9. Расположение микротрещин в образце:
а — стадия *III*,
б — стадия *IV*

Отсюда следует, что разрушение породы — не дискретный процесс и простое применение теории «слабого звена» не отвечает действительности. Развитие разрушения в породе имеет интегральный характер и связано со сложным процессом кумулятивного роста малых разрушений. Поэтому критерий разрушения должен основываться на процессе микроразрушений, с учетом того, что наступление стадии *IV* определяет прочность породы.

Основной принцип, заключающийся в том, что окончательному разрушению породы предшествует процесс накоплений микроразрушений, имеет важное практическое значение. Так, выбросы в шахтах представляют разрушение породы в большом масштабе, которому должен предшествовать также в большом масштабе процесс микроразрушений. Исследования А. Г. Константиновой [4], С. Д. Виноградова [3] показали, что во многих случаях выбросы могут быть предсказаны по возрастанию микроразрушающей активности в том или другом месте. Такое возрастание активности микроразрушений соответствует стадии *III* процесса. Систематические наблюдения открывают возможности предсказания как места, так и времени выброса.

Различные взгляды на механизм разрушения породы вызваны недостаточностью экспериментальных данных о процессах, предшествующих разрушению образца. Необходимое условие расширения знаний в этой области состоит в непрерывном совершенствовании аппаратуры по регистрации интенсивности микроразрушений и их расположения в образце по мере повышения нагрузки.

В обычных статических испытаниях диаграмма σ—ε обрывается при достижении предела прочности. С этого момента порода разрушается самопроизвольно. Поэтому создается впечатление, что предел прочности и полное разрушение совпадают. В работе по исследованию прочности пород изгибающим ударом на копре системы Ленинградского горного института [2] показано, что диаграмма σ—ε плавно продолжается за пределом прочности на достаточно большом протяжении. Так, например, приведенная на рис. 10 диаграмма σ—ε «змеевика» продолжена до напряжения, равного 50% от максимального, сланца —

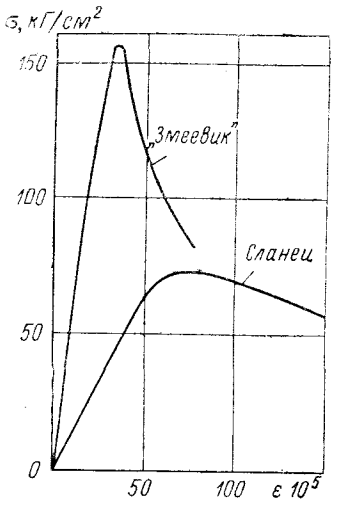


Рис. 10. Диаграммы σ — ε для змеевика и сланца

до 80%. Эти данные говорят о том, что после достижения предела прочности порода сохраняет способность сопротивляться нагрузке.

Знание прочностных и деформационных свойств за пределом прочности важно для определения устойчивости горных выработок. Возможна ситуация, при которой порода, окружающая выработку, достигла предела прочности, однако выработка остается устойчивой. Степень устойчивости зависит от характеристики породы за пределом прочности.

Для получения полной диаграммы σ—ε в обычных условиях статического нагружения следует применить метод «жесткого» нагружения. Дело в том, что после достижения образцом предела прочности дальнейшее повышение нагрузки невозможно ввиду отсутствия необходимой для этого реакции. Испытательная машина не может продолжать накапливать упругую энергию, так как образец прекратил сопротивление.

При «жестких» испытаниях на обычной машине образец испытывается параллельно со стальными стержнями, которые воспринимают повышение нагрузки после достижения образцом предела прочности.

«Жесткие» испытания дали много ценного материала. Так, при одноосном сжатии на обычной машине характер разрушения образца зависит от соотношения размеров давильных плит и поперечного сечения образца: если размеры плит больше поперечных размеров образца, происходит разрушение срезом, при одинаковых поперечных размерах плит и образца разрушение происходит параллельно сжимающему напряжению.

При одноосном сжатии «жестким» методом образец во всех случаях разрушается по вертикальной плоскости параллельно приложенной нагрузке.

При трехосном сжатии в обычной машине образцы разрушаются путем среза. При аналогичных условиях в жесткой машине образцы разрушаются в направлении, параллельном наибольшему главному напряжению. Эти результаты показывают, что действительной формой разрушения как при одно-, так и трехосном сжатии является разрушение по плоскости, параллельной наибольшему главному напряжению. Чтобы убедиться в этом, нужно освободить испытания от влияния машины, т. е. применить метод «жесткого» испытания.

Процесс хрупкого разрушения, согласно рис. 7, применим не только для объемного сжатия, но и для растяжения. Разница заключается в том, что при растяжении трещины не закрываются, а распространяются в собственной плоскости, ввиду чего продолжительность процесса разрушения гораздо меньше, чем при сжатии. При растяжении начало разрушения и его быстрое распространение весьма близки друг к другу, при сжатии они существенно отличаются.

Таким образом, практически можно принять, что для растяжения начало разрушения и предел прочности совпадают.

Сопротивление породы разрыву является основным параметром теорий прочности горных пород, так как процесс трещинообразования связан прежде всего с разрывом. Этим же объясняется усилившийся в последние годы интерес к испытаниям на разрыв. Многочисленные

исследования по Бразильской пробе, по прочности образцов кольцевой и неправильной формы свидетельствуют о стремлении выявить закономерности сопротивления пород разрыву косвенными методами.

Прямым методам уделяется недостаточно внимания в связи с трудностями, возникающими при проведении испытаний. В первую очередь к ним относятся концентрация напряжений в районе головок и нецентренность приложения нагрузки. По этим причинам критерии прочности горных пород используют в качестве основного параметра прочность на простое сжатие вместо прочности на простое растяжение. Один параметр заменяется другим, исходя из гипотезы, положенной в основу того или иного критерия. Разумеется, что подобная замена ухудшает дело, так как вносит дополнительные погрешности и увеличивает расхождение между опытными и теоретическими данными.

Кафедра сопротивления материалов Ленинградского горного института в работах по прочности уделяет большое внимание исследованиям в области растяжения [2]. Положительные результаты, имеющие практическое значение, получены при усовершенствовании испытаний на простое растяжение. Речь идет о методе центровки, который обеспечивает центральное приложение нагрузки при минимальной концентрации напряжений. К образцу прямоугольного сечения эпоксидным клеем приклеиваются треугольные или фасонные головки из стали. Конструкция захватов (рис. 11) предусматривает свободное скольжение сухарей, что дает образцу возможность занять положение, совпадающее с направлением приложенной нагрузки. Центральность при-

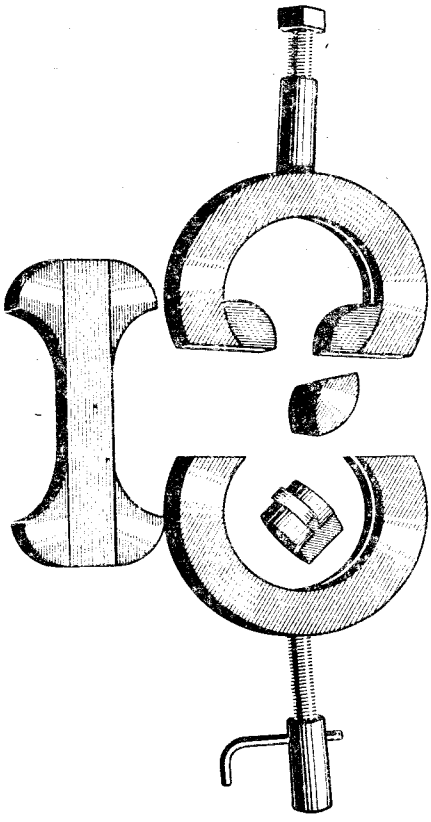


Рис. 11. Приспособление для центровки образцов с треугольными головками

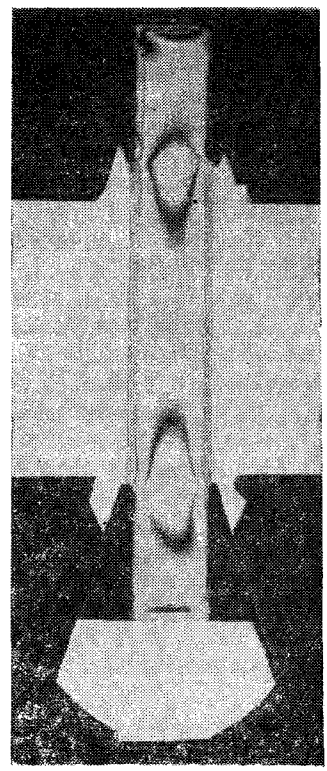


Рис. 12. Фото полос образца с треугольными головками

ложенной нагрузки и степень концентрации напряжений исследовались оптическим методом (рис. 12). Из рис. 12 видно симметричное распределение полос относительно оси образца. Предложенный метод отличается малой трудоемкостью, пригоден для массовых испытаний и позволяет надежно определить прочность на растяжение *.

Исследования по теории прочности горных пород, основанной на механизме разрушения, не дали пока желаемых результатов. Многочисленные работы, преследующие цель использовать теорию Гриффитса и ее модификацию, привели к тому, что эти критерии во многих случаях успешно применяются как феноменологические. Однако развитие теории Гриффитса применительно к горным породам было весьма плодотворным. В результате стремления связать теорию прочности с механизмом разрушения были выяснены новые важные закономерности, имеющие большое значение для понимания процессов, происходящих в образце при его нагружении: распространение трещины в условиях сжатия, влияние трения, влияние скорости распространения трещины, характер разрушения при различных напряженных состояниях.

Что касается построения теории прочности горных пород, основанной на механизме разрушения, то, в первую очередь, это связано с дальнейшим совершенствованием методов изучения механизма разрушения породы. Исследования в этом направлении являются весьма ценными и способствуют обогащению механики горных пород новыми данными, имеющими важное научное и практическое значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г. И. Журнал прикладной механики и технической физики, 1961, 4.
2. Бурштейн Л. С. Статические и динамические испытания горных пород. Недра, 1970.
3. Виноградова С. Д. Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород в руднике Анка (Чехословакия). Известия АН СССР, Сер. геофизика. Т. 4, 1963.
4. Константинова А. Г. О прогнозе динамических явлений в угольных шахтах. АН СССР. Известия Физики Земли. 1969, т. 2.
5. Beniavski Z. T. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 4, 1967.
6. Brace W. F. Elsvier. Brittle fracture of rocks, 1963.
7. Griffith A. A. Phil. Trans. Roy. Soc. 1920, ser. A, 221.
8. Scholz C. H. Proceedings of the second congress of the intern. Soc. for rock mech. 1970, Beograd.

* В испытаниях на растяжение принимала участие доцент Т. А. Пономарева.