Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. LI, вып. 1, 1966 г.

УДК 622.831

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Н. А. Синькевич

С развитием теоретических и экспериментальных исследований все более проясняется общая картина проявлений горного давления, механизм деформаций и разрушений горных пород во времени и пространстве. Устанавливается, что одним из главных действующих факторов является не кратковременная, как считалось раньше, а длительная прочность. Вопросы устойчивости, надежности крепления очистных и подготовительных выработок и многие другие не могут быть удовлетворительно решены без учета этого фактора. Специфика решения этих вопросов (недолговечность многих горных выработок, изменение горногеологических условий и пр.) обуславливает необходимость получения характеристик длительной прочности в кратчайшие сроки. Существующий способ определения этих характеристик с помощью специальной аппаратуры при испытании под постоянной нагрузкой требует длительного времени (от нескольких месяцев до нескольких лет) и не удовлетворяет необходимым условиям.

В настоящей статье в порядке постановки вопроса дается обоснование упрощенного скоростного метода определения длительной прочности горных пород, строительных и других непластичных и непористопластичных материалов. Рекомендуемый метод дает возможность установить необходимые характеристики в течение сравнительно короткого периода (от нескольких часов до нескольких суток), который при высокой точности испытательных установок может быть сокращен до одного-двух часов.

Анализ ряда исследований [Бартенев, Зуев, 1964; Белянкин, 1931; Берг, 1950; Водопьянов, Уразова, 1964; Журков, Нарзуллаев, 1953, 1959; Таль, Чистяков, 1962; Griggs, 1936 и др.] показал, что закономерности, которым подчиняются характеристики длительной прочности большинства материалов, носят общий характер. Исключение составляют лишь некоторые пористо-пластичные породы, бетоны на стадии затвердевания, некоторые виды резин и пр.

Взаимосвязь между напряжением сжатия (растяжения) в образце материала σ и временем его разрушения (существования) τ обычно выражается экспоненциальным уравнением

$$\tau = A \exp(-\alpha\sigma), \qquad (1)$$

где A — коэффициент, зависящий от прочностных характеристик материала и условно характеризующий время разрушения образца без внешней нагрузки, *мин*;

α — коэффициент, характеризующий скорость потери прочности образцом и зависящий от физико-механических свойств материала образца, $см^2/кГ$.

Эта зависимость получена при испытании на длительную прочность для древесины при поперечном изгибе (рис. 1) Ф. П. Белянкиным [1931], для известняка при неравномерном объемном сжатии Д. Григсом [Griggs, 1936], при разрушении образцов различных материалов от растягивающих напряжений (рис. 2, прямые *1—6*) Б. Н. Нарзуллаевым [1953], для бетона Г. Рюшем [1959, 1960], а также К. Э. Таммом и Е. А. Чистяковым [1962] и др. В полулогарифмических координатах это уравнение представляет прямую линию.

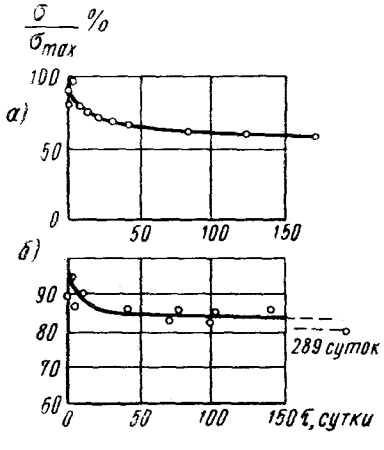


Рис. 1. Опытные кривые длительного сопротивления древесины поперечному изгибу по Ф. П. Белянкину [1931]: *а* — липы; *б* — сосны.
σ_{max} — разрушающее напряжение при кратковременных испытаниях.

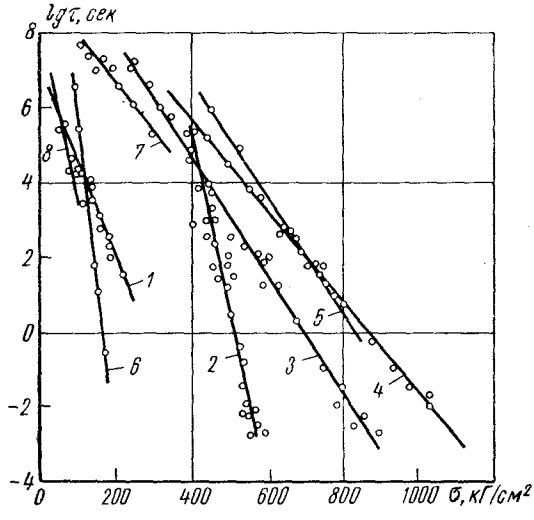


Рис. 2. Временная зависимость прочности твердых тел:

1 — поливинилхлорид; *2* — алюминий; *3* — полиметилметакрилат; *4* — цинк; *5* — целлулоид; *6* — хлористое серебро; *7* — обводненный алебастр; *8* — карналлит.

Нами обработаны (см. рис. 2, прямые *7*, *8*) данные испытаний сильно обводненного алебастра Д. Григгса [1936] и солей карналлита В. Л. Водопьянова и А. М. Уразовой [1964] под длительным одноосным сжатием.

Как известно, кратковременная прочность материала зависит от принятой скорости нагружения образцов. В свое время это обусловило создание единого международного стандарта скорости нагружения ($5 \div 10$ $кГ/см^2сек$) при испытаниях на кратковременную прочность. С физической точки зрения увеличение кратковременного предела прочности при повышении скорости нагружения образцов вполне закономерно: чем выше скорость нагружения, тем значительней силы внутреннего трения и инерции, тем больше плоскостей разрушения.

Это явление наблюдали Л. М. Перелыгин (рис. 3) и К. П. Кошкаров [1939; 1949], которые определяли зависимость предела прочности и пропорциональности от скорости нагружения для древесины дуба, сосны и липы. В работах Г. Рюша [1959, 1960] показана зависимость предела кратковременной прочности бетона при одноосном сжатии от скорости нагружения (рис. 4).

С. Н. Журков и Б. Н. Нарзуллаев [1953] экспериментально доказали гипотезу о необратимости процесса разрушения для твердых материалов, которые не перекристаллизовываются в процессе разрушения. Образцы материала испытывались при постоянном напряжении в один или два приема. Идентичность полученных результатов доказывает, что в подвергнутом нагрузке образце происходит непрерывный процесс, в результате которого постепенно накапливаются необратимые структурные изменения. Эти изменения сопровождаются снижением прочности, которая при снятии нагрузки не восстанавливается.

Таким образом, процесс разрушения материала при возрастающей нагрузке принципиально не отличается от разрушения под действием постоянной нагрузки. Единственное отличие заключается в том, что при

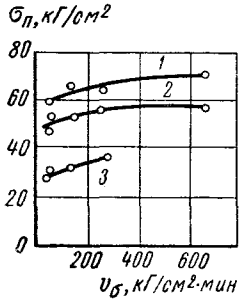


Рис. 3. Влияние скорости нагружения V_σ на предел пропорциональности $\sigma_п$, по данным Перелыгина [1939]: *1* — дуб; *2* — сосна; *3* — липа.

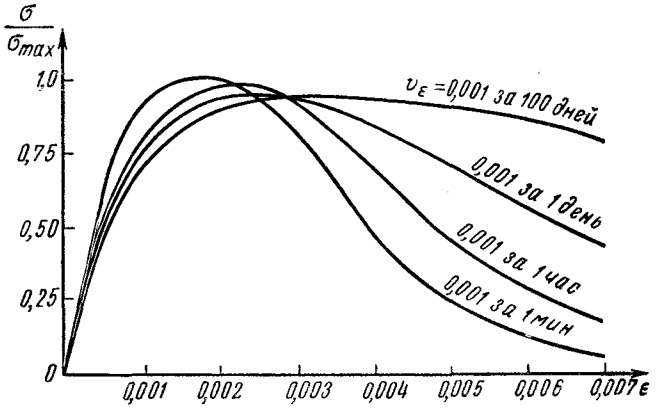


Рис. 4. Кривые напряжения — деформации при различных скоростях деформации v_τ при нагружении бетона в возрасте 56 дней, по данным Г. Рюша [1960] (одноосное сжатие), при $\sigma_{max} = 210$ *кГ/см²*.

постоянной нагрузке пластические деформации выше и на единицу разрушенного объема материала затрачивается больше энергии, так как при длительной нагрузке часть энергии поглощается частичной перекристаллизацией. Об этом свидетельствует и увеличение пластических деформаций. Однако этот вопрос окончательно не решен, поэтому эмпирическая формула (1) теоретически пока не доказана.

Для использования ее при установлении длительной прочности необходимо определить коэффициенты A и α.

Образец, подвергнутый сжатию в течение какого-то отрезка времени, теряет часть своей прочности, которую на основании необратимости процесса разрушения можно выразить в виде отношения времени приложения нагрузки к общему времени существования (разрушения) образца при данной нагрузке. Если при разных напряжениях (σ_1, σ_2, . . ., σ_n), прикладываемых соответственно в течение промежутков времени (τ_1, τ_2, . . ., τ_n) довести образец до разрушения, то суммарная потеря прочности должна составить единицу

$$\frac{\tau_1}{A\exp(-\alpha\sigma_1)} + \frac{\tau_2}{A\exp(-\alpha\sigma_2)} + \ldots + \frac{\tau_n}{A\exp(-\alpha\sigma_n)} = 1. \qquad (2)$$

Если промежутки времени одинаковы и достаточно малы ($\tau_1 = \tau_2 = \ldots \tau_n = \Delta\tau$), а нарастание напряжения принять постоянным, то

зависимость напряжения от времени можно записать в виде $\sigma_i = bi\Delta\tau$. В пределе (при $i \to \infty$ и $\Delta\tau \to 0$) $\sigma = b\tau$ (b — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость увеличения нагрузки во времени).

Тогда, преобразуя левую часть равенства (2), заменяя $\sigma = b\tau$ и переходя в пределе к интегралу, получим

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta\tau}{A\exp(-\alpha\sigma_i)} = 1, \quad \int_0^{\tau_n} \frac{d\tau}{A\exp(-\alpha b\tau)} = 1, \tag{3}$$

$$A = \int_0^{\tau_n} \exp(\alpha b\tau)d\tau, \quad A = \frac{1}{\alpha b}[\exp(\alpha b\tau) - 1].$$

Для решения этого уравнения с неизвестными величинами A и α необходимо экспериментальное определение длительности существования (разрушения) образцов τ_n при различных значениях скорости нагружения b *. Неизвестные коэффициенты A и α можно определить решением системы уравнений, составленной по двум (или больше) испытаниям

$$A = \frac{1}{\alpha b_1}[\exp(\alpha b_1\tau_{1n}) - 1], \tag{4}$$

$$A = \frac{1}{\alpha b_2}[\exp(\alpha b_2\tau_{2n}) - 1], \tag{4'}$$

где b_i и τ_{in} — скорость нагружения и среднее время разрушения образцов в i-м испытании.

Приравняв уравнения (4) и (4'), получим

$$\frac{1}{b_1}[\exp(\alpha b_1\tau_{1n}) - 1] = \frac{1}{b_2}[\exp(\alpha b_2\tau_{2n}) - 1]. \tag{5}$$

Если материал образца достаточно прочен, можно воспользоваться более простым уравнением

$$b_2\exp(\alpha b_1\tau_{1n}) = b_1\exp(\alpha b_2\tau_{2n}).$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{\ln b_2 - \ln b_1}{b_2\tau_{2n} - b_1\tau_{1n}}. \tag{6}$$

В отдельных случаях при незначительной прочности материала или для повышения точности уравнение (5) следует решать графически.

Значение коэффициента A можно найти из уравнений (4) или (4') и (6)

$$A = \frac{b_2\tau_{2n} - b_1\tau_{1n}}{(\ln b_2 - \ln b_1)\,b_1}\left[\exp\left(\frac{\ln b_2 - \ln b_1}{b_2\tau_{2n} - b_1\tau_{1n}}\,b_1\tau_{1n}\right) - 1\right]. \tag{7}$$

Длительная прочность $\sigma_{дл}$ определяется из уравнения (1) при достаточно больших τ_n и коэффициентах A и α, полученных по (6) и (7)

$$\sigma_{дл} = \frac{\ln A - \ln \tau_n}{\alpha}. \tag{8}$$

Таким образом, сущность предлагаемого способа определения длительной прочности заключается в следующем.

1. Отбирают, обрабатывают и шлифуют в необходимом количестве образцы кубической формы с длиной грани не менее 45 *мм* (или цилиндрической формы при высоте образца, равной его диаметру).

* В простейшем случае для решения уравнения (3), по-видимому, достаточно провести испытания при двух скоростях нагружения b.

2. Устанавливают скорости нагружения образцов b_1, b_2 . . . Для удобства расчета целесообразны b, равные 0,01; 0,1; 1,0; 10,0 . . ., *кГ/см²мин*. Надо иметь в виду, что чем ниже кратковременный предел прочности образцов, тем меньше должна быть и скорость нагружения.

3. С помощью обычных прессов, предназначенных для испытаний образцов на кратковременную прочность, при установленной скорости нагружения испытывают образцы с одновременной фиксацией длительности каждого испытания.

4. По средним значениям b_1, b_2, . . . и τ_{1n}, τ_{2n}, . . . из формул (6) и (7) определяют значения коэффициентов A и α, характеризующих длительную прочность.

5. По формуле (8) определяют длительную прочность материала, соответствующую заданному сроку службы τ_n.

Нами проверена состоятельность предлагаемой методики. Основной принцип этой проверки заключался в следующем: если метод верен, то должны выполняться два основные условия: 1) кривые зависимости кратковременной прочности $\sigma_{кр}$ от скорости нагружения должны подчиняться закономерности (3), которая после преобразования приобретает вид

$$\sigma_{кр} = \frac{\ln(A\alpha b + 1)}{\alpha}; \qquad (9)$$

2) значения коэффициентов A и α, вычисленные по кратковременным испытаниям и полученные при длительных испытаниях под постоянной нагрузкой должны совпасть.

Обработка экспериментальных данных Л. М. Перелыгина [1939] показала (см. рис. 3), что кривые зависимости предела пропорциональности древесины (практически равнозначные кривым кратковременной прочности) от скорости нагружения при поперечном изгибе с высокой точностью подчиняются закономерности (9) при коэффициентах A и α:

	A, *сек*	α, *см²/кГ*
Для липы	$2{,}1 \cdot 10^3$	0,218
Для сосны	$9{,}56 \cdot 10^7$	0,343
Для дуба	$5.83 \cdot 10^6$	0.235

Значения коэффициентов A и α, определенные нами этим методом по данным кратковременных испытаний бетона по Г. Рюшу [1960] (рис. 4), совпали с данными, полученными при длительном нагружении постоянной нагрузкой при $A = 4{,}13 \cdot 10^{56}$ *сек* и $\alpha = 0{,}62$ *см²/кГ*. Отклонение α от среднего значения составило от 5 до 12%. Учитывая, что эти данные не осреднены, а представляют единичные наблюдения, полученную сходимость можно считать удовлетворительной. Предлагаемый метод после проверки на различных горных породах может быть рекомендован для определения длительной прочности.

ЛИТЕРАТУРА

Бартенев Г. М., Зуев Ю. С. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов. Изд-во Химия, 1964.

Белянкін Ф. П. Збірник праць Інституту Будівельної Механіки, ВУАН, № 7, 1931.

Берг О. Я. К вопросу о прочности и пластичности бетона. ДАН СССР, т. 70, № 4, 1950.

Водопьянов В. Л., Уразова А. М. Некоторые результаты изучения деформируемости карналлита во времени. Науч. тр. Пермского НИУИ, сб. VII, 1964.

Журков С. Н. и Нарзуллаев Б. Н. Временная зависимость прочности твердых тел. ЖТФ, т. XXIII, вып. 10, 1953.

Журков С. Н., Томашевский Э. Е. Сб. Некоторые проблемы прочности твердого тела. Изд-во АН СССР, 1959.

Кашкаров К. П. Испытание древесины в мокром состоянии на сжатие и растяжение вдоль волокон. Сб. тр. НИИ по строительству Минмашстроя, № 2, 1949.

Перелыгин Л. М. Влияние влажности на сопротивление древесины ударному изгибу. Бюлл. АН СССР, № 85, 1939.

Таль К. Э. и Чистяков Е. А. Экспериментальное исследование гибких железобетонных стержней при длительном нагружении. В кн. Исследование прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных конструкций. Госстройиздат, 1962.

Griggs D. J. Geology, v. XLIV, № 5, 1936, p. 541.

Rüsch H. Zement, Kalk, Gips, № 1, 1959.

Rüsch H. J. Am. Concr. In-te, July, 1960.