

УДК 622.023.25:539.32

С.В. Сукнёв, С.П. Фёдоров

СТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД*

Приведён сравнительный анализ принятых в 2004–2010 гг. в США, Германии и России новых редакций стандартов определения упругих свойства горных пород (статический модуль упругости, коэффициент Пуассона) при одноосном сжатии, отмечены преимущества и недостатки.

Ключевые слова: горные породы, сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона.

В настоящее время за рубежом упругие свойства горных пород при одноосном сжатии определяют, как правило, по стандартам ASTM D7012-10 [1] или DIN EN 14580 [2]. Согласно стандарту ASTM D7012-10 (последняя редакция принята в 2010 году) модуль Юнга (модуль упругости) определяют по диаграмме деформирования образца, построенной в координатах «напряжение — осевая деформация» (рис. 1). Осевую (продольную) деформацию ε_a рассчитывают по данным измерения перемещения образца вдоль оси нагружения с помощью установленного на нём датчика деформаций:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L},$$

где L — начальная (недеформированная) база датчика; ΔL — измеренное изменение базы датчика в результате деформирования. Аналогичным образом рассчитывают поперечную деформацию ε_l .

Модуль Юнга определяют по наклону диаграммы деформирования одним из трёх способов (рис. 1):

1. По тангенсу угла наклона диаграммы в определённой точке (обычно при уровне напряжений, составляющем 50 % от предела прочности материала при одноосном сжатии σ_c).

2. По наклону более-менее линейного участка диаграммы, для аппроксимации которого используют, при необходимости, метод наименьших квадратов.

3. По наклону секущей, которую проводят из нуля до определённой точки диаграммы.

Применение первых двух способов требует предварительной математической обработки (сглаживания и аппроксимации) исходных данных, что существенно усложняет процедуру вычислений. Более практичным является третий способ. Для его применения необходимо знать только значение измеренной деформации при определённом уровне нагружения образца.

Для определения коэффициента Пуассона необходимо тем же способом вычислить наклон диаграммы поперечных деформаций и рассчитать (со знаком «минус») отношение наклона диаграммы продольных деформаций к наклону диаграммы поперечных деформаций.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-05-98503).

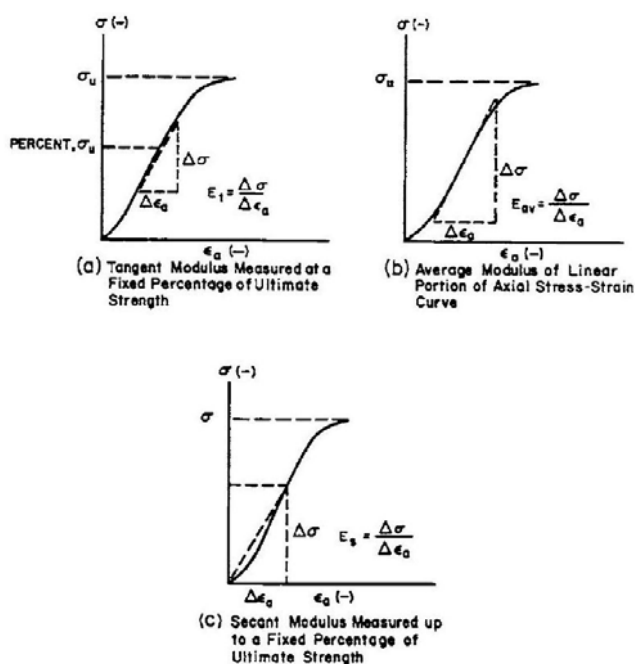


Рис. 1. Способы расчёта модуля Юнга по диаграмме «напряжение — осевая деформация» (рисунок из стандарта ASTM D7012-10 [1])

Главным недостатком метода определения упругих свойств горных пород по ASTM D7012-10 является неучёт нелинейного характера диаграммы деформирования. В стандарте содержится, например, замечание о том, что на измеренную величину коэффициента Пуассона значительное влияние оказывает нелинейность диаграмм (продольной и поперечной) деформирования при низких уровнях нагружения, но конкретные рекомендации по её учёту не приводятся. Также не указывается, до какой точки диаграммы следует проводить секущую, чтобы не попасть в область нелинейных деформаций при высоких уровнях нагружения. Таким образом, стандарт предоставляет большую свободу в выборе диапазона измерения деформаций, что может привести к неоднозначному и некор-

ректному определению упругих свойств горных пород.

Рассмотрим типичные диаграммы деформирования горных пород, которые в схематичном виде приводятся во многих учебниках, монографиях и научных публикациях. К примеру, рис. 2 взят из работы [3].

На нём приведены типичные для исследованного в работе гранита диаграммы продольных и поперечных деформаций и показаны характерные участки диаграмм. Первый участок характеризует

закрытие изначально присутствующих в образце микротрещин, второй — упругое деформирование материала, третий — начало образования новых трещин в образце, четвёртый — нестабильное трещинообразование, которое завершается полным разрушением образца. Упругие свойства материала должны определяться на втором участке диаграмм. Для их корректного определения необходимо установить нижнюю и верхнюю границы участка.

Из литературных данных, в том числе, полученных методом акустической эмиссии [4], известно, что для большинства горных пород верхняя граница упругого участка лежит в области 30–50 % от предельной нагрузки, которую выдерживает образец. Для нижней границы такие данные отсутствуют. Известно лишь, что для некоторых твёрдых пород линейный участок может

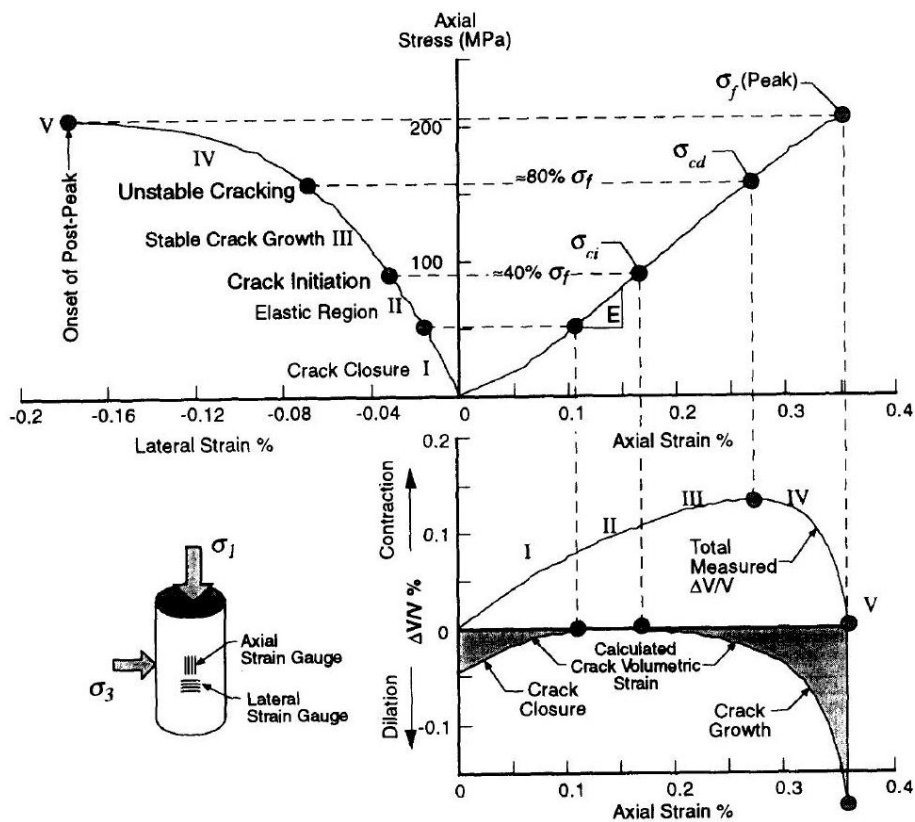


Рис. 2. Характерные участки диаграмм деформирования горных пород (рисунок из работы [3])

начинаться практически с начала диаграммы, а для других начальный участок диаграммы имеет выраженную нелинейность, причём для диаграмм продольных и поперечных деформаций протяжённость нелинейного участка может существенно различаться.

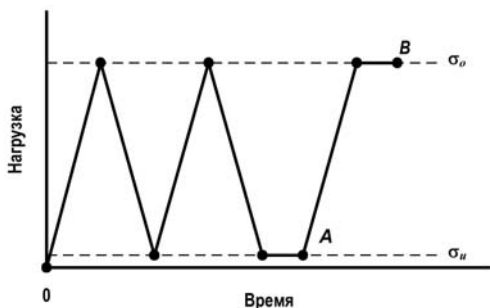


Рис. 3. Диаграмма «нагрузка — время»

Немецкий стандарт DIN EN 14580 (принят в 2005 году) в отличие от стандарта ASTM D7012-10 содержит чёткие указания по поводу диапазона измерения деформаций для определения статического модуля упругости (модуля Юнга). Нижнее напряжение σ_u составляет 2%, а верхнее σ_o — 33% от предела прочности материала при одноосном сжатии. Модуль упругости вычисляется следующим образом:

$$E = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u},$$

где ε_u и ε_o — измеренные деформации при нижнем и верхнем напряжении, соответственно.

Ещё одним существенным отличием стандарта DIN EN 14580 является обязательное уплотнение образца перед проведением измерений. Для этого образец дважды подвергается нагружению до верхнего напряжения σ_o с последующей разгрузкой до нижнего напряжения σ_u . Только на третьем цикле нагружения в точках А и В (рис. 3) производится измерение деформаций ϵ_u и ϵ_o . Предварительное уплотнение образца необходимо для получения стабильных деформационных характеристик материала.

Следует подчеркнуть, что стандарт DIN EN 14580 относится только к определению модуля Юнга и ничего не говорит об определении коэффициента Пуассона. Вполне естественно для его определения воспользоваться той же процедурой, которая прописана в ASTM D7012-10, но вопрос о границах упругого интервала для измерения поперечной деформации остаётся открытым, поскольку достаточных оснований переносить установ-

ленные в стандарте DIN EN 14580 значения σ_u и σ_o на диаграмму поперечных деформаций нет.

В России и странах СНГ для определения упругих свойств горных пород при одноосном сжатии в большинстве случаев используют ГОСТ 28985—91 [5]. Введённый в действие в 1992 году стандарт разработан с учётом возможностей применявшегося тогда испытательного и измерительного оборудования и не учитывает возможностей современных испытательных машин и датчиков деформаций. В 2004 году стандарт был переиздан без изменений и получил статус межгосударственного стандарта (для стран СНГ). В соответствии с ГОСТ 28985-91 упругие характеристики материала определяют при разгрузке образца после его нагружения до максимального уровня σ_m , который должен быть не ниже 50 % от предела прочности материала при одноосном сжатии σ_c (рис. 4).

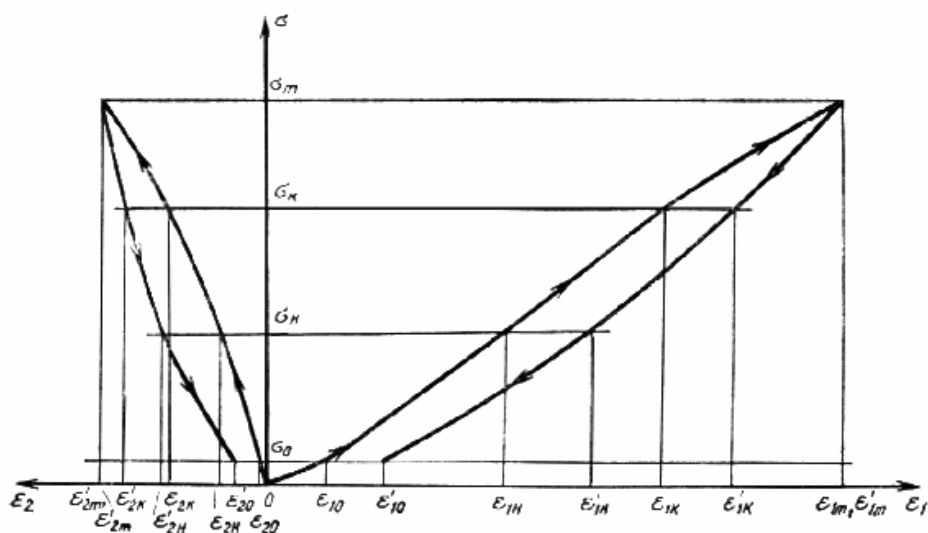


Рис. 4. Диаграммы нагружения и разгрузки горных пород (рисунок из ГОСТ 28985-91 [5])

Поскольку для большинства горных пород необратимые структурные изменения, связанные с процессами образования микротрещин, начинаются при напряжениях, составляющих 30–50 % от σ_c , то определённые по диаграммам нагружения и разгрузки деформационные характеристики, строго говоря, упругими не являются. Поэтому определение модуля упругости (модуля Юнга) и коэффициента Пуассона по ГОСТ 28985-91 физически некорректно.

Кроме того, из-за необратимых структурных изменений невозможно повторное испытание образца. Это не позволяет проследить за изменением упругих характеристик материала при изменении условий нагружения, например, при изменении температуры образца, что важно знать для проектирования горных сооружений в условиях криолитозоны. При каждой температуре необходимо проводить испытание нового образца, что не только трудоёмко, поскольку связано с дополнительными затратами на изготовление образцов, но и просто некорректно с точки зрения постановки экспериментального исследования.

Необходимо также отметить, что стандарт не распространяется на мёрзлые горные породы.

На основе проведённого выше анализа существующих стандартных методов определения упругих свойств горных пород при одноосном сжатии видно, что в наибольшей степени требованиям физической корректности отвечает немецкий стандарт DIN EN 14580. В этом стандарте содержатся два принципиальных момента, отличающие его от ASTM D7012-10 и ГОСТ 28985-91. Во-первых, максимальная нагрузка ограничена величиной 33 % от σ_c , а во-вторых, проведению испытания предшествует обязательное уплотнение образца. Соблюдение этих требований обеспечивает обратимое упругое деформирование образца во время испытания. Однако, как уже было отмечено, этот стандарт разработан только с целью определения модуля упругости. Для определения коэффициента Пуассона методика должна быть доработана с учётом необходимости обеспечить обратимое линейно-упругое деформирование образца, как в продольном, так и в поперечном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ASTM D7012-10. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. — West Conshohocken: ASTM International, 2010.
2. DIN EN 14580. Prüfverfahren für Naturstein — Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls. — Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2005.
3. Martin C.D., Chandler N.A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. — 1994. — Vol. 31, No. 6. — P. 643–659.
4. Cai M., Kaiser P.K., Tasaka Y., Maejima T., Morioka H., Minami M. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. — 2004. — Vol. 41, No. 5. — P. 833–847.
5. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. — 10 с. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Сукнёв Сергей Викторович — доктор технических наук, зав. лабораторией, suknyov@igds.ysn.ru,
Фёдоров Сальвадор Петрович — кандидат технических наук, научный сотрудник, s.fedorov@igds.ysn.ru,
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН.