

## НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.023.25:539.32

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

**С. В. Сукнев**

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,  
E-mail: suknyov@igds.ysn.ru,  
просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

Выполнен сравнительный анализ международных стандартов определения упругих свойств горных пород при одноосном сжатии, отмечены их преимущества и недостатки. Представлены результаты измерения продольных и поперечных деформаций образцов горных пород, а также эталонных металлических образцов при сжатии с помощью экстензометров различного типа. Проанализирована возможность их использования для вычисления модуля упругости и коэффициента Пуассона материала при изменении температуры. Приведены примеры определения упругих свойств вмещающих пород на месторождении алмазов трубки “Ботуобинская” в талом и мерзлом состояниях.

*Горные породы, сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона*

В настоящее время в России для определения упругих свойств горных пород при одноосном сжатии используют ГОСТ 28985-91 [1]. Введенный в действие в 1992 г. стандарт был переиздан без изменений в 2004 г. и получил статус межгосударственного для стран СНГ. Согласно ГОСТ 28985-91, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала определяют при разгрузке образца после его нагружения до заданного уровня, который должен быть не ниже 50 % от предела прочности материала при одноосном сжатии  $\sigma_c$ . Известно [2–4], что для большинства горных пород верхняя граница упругого участка лежит в области 30–50 % от  $\sigma_c$ , после чего в образце начинают происходить необратимые структурные изменения, связанные с образованием и развитием микротрещин. Поэтому определение упругих характеристик для горных пород по ГОСТ 28985-91 недостаточно корректно.

Кроме того, из-за необратимых структурных изменений не всегда можно осуществить повторное испытание образца. Это не позволяет проследить за изменением упругих свойств геоматериала при различных условиях нагружения, например при изменении температуры образца, что важно знать для проектирования горных сооружений в условиях криолитозоны или применения геотехнологий, предусматривающих замораживание породного массива. В таких случаях при каждом температурном значении необходимо проводить испытание нового образ-

ца, что не только трудоемко, поскольку связано с дополнительными затратами на изготовление образцов, но и соблюдением условия “повторяемости” экспериментального исследования. Необходимо также отметить, что обсуждаемый стандарт не распространяется на мерзлые горные породы.

В настоящей работе разрабатывается метод определения упругих свойств горных пород при изменении температуры путем измерения малых обратимых деформаций образца горной породы в упругой области и рассматривается вопрос о возможности использования для этих целей современных прецизионных экстензометров.

### АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

За рубежом упругие свойства горных пород при одноосном сжатии определяют, как правило, по стандартам ASTM D7012-10 [5] или DIN EN 14580 [6]. Согласно стандарту ASTM D7012-10 (последняя редакция принята в 2010 г.), модуль Юнга (модуль упругости) рассчитывают по диаграмме деформирования образца, построенной в координатах “напряжение – продольная деформация”. Продольную деформацию  $\varepsilon_a$  вычисляют по перемещениям точек образца вдоль оси нагружения с помощью установленного на нем экстензометра (датчика деформаций):  $\varepsilon_a = \Delta L/L$ , где  $L$  — начальная (недеформированная) база датчика;  $\Delta L$  — измеренное изменение базы датчика в результате деформирования. Аналогичным образом вычисляют поперечную деформацию  $\varepsilon_l$ .

Модуль Юнга рассчитывают по наклону диаграммы деформирования одним из трех способов (рис. 1):

- по тангенсу угла наклона диаграммы в заданной точке — обычно при уровне напряжений, составляющем 50 % от  $\sigma_c$  (рис. 1а);
- по наклону линейного участка диаграммы, для аппроксимации которого используют метод наименьших квадратов (рис. 1б);
- по наклону секущей, которую проводят из нуля до определенной точки диаграммы (рис. 1в).

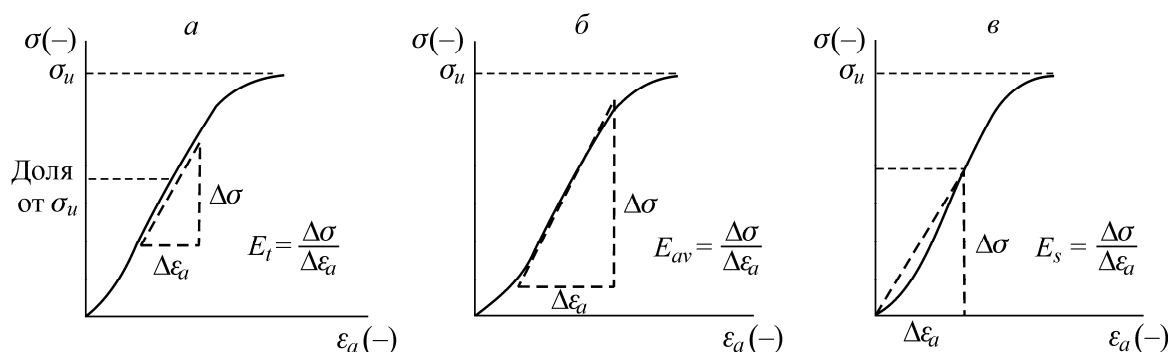


Рис. 1. Способы расчета модуля Юнга по диаграмме “напряжение – продольная деформация” (рисунок из стандарта ASTM D7012-10 [5])

Применение первых двух способов требует предварительной математической обработки (сглаживания и аппроксимации) исходных данных, что существенно усложняет процедуру вычислений. Более практичным является третий способ, где необходимо знать только значение измеренной деформации при заданном 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.

Главным недостатком метода ASTM D7012-10 является неучет 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 ее учету 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 некорректному определению упругих свойств горных пород.

Стандарт DIN EN 14580 (принят в 2005 г.), в отличие от стандарта ASTM D7012-10, содержит четкие указания по поводу диапазона измерения деформаций для расчета статического модуля упругости (модуля Юнга). Нижнее напряжение  $\sigma_u$  составляет 2%, а верхнее  $\sigma_o$  — 33% от предела прочности материала при одноосном сжатии. Модуль упругости вычисляется следующим образом:

$$E = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{(\varepsilon_a)_o - (\varepsilon_a)_u}, \quad (1)$$

где  $(\varepsilon_a)_u$  и  $(\varepsilon_a)_o$  — измеренные продольные деформации при нижнем и верхнем напряжении соответственно.

Еще одним существенным отличием стандарта DIN EN 14580 является обязательное уплотнение образца перед проведением измерений. Для этого образец дважды подвергается нагружению до верхнего напряжения  $\sigma_o$  с последующей разгрузкой до нижнего напряжения  $\sigma_u$ . Только на третьем цикле нагружения в точках *A* и *B* (рис. 2) проводится измерение деформаций  $(\varepsilon_a)_u$  и  $(\varepsilon_a)_o$ . Предварительное уплотнение образца необходимо для получения стабильных деформационных характеристик материала.

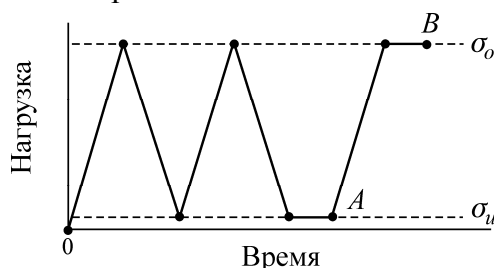


Рис. 2. Диаграмма “нагрузка – время”

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 получения воспользоваться той же процедурой, которая прописана в ASTM D7012-10, но вопрос о границах упругого интервала для измерения поперечной деформации остается открытым, поскольку достаточных оснований переносить установленные в стандарте DIN EN 14580 значения  $\sigma_u$  и  $\sigma_o$  на диаграмму поперечных деформаций нет.

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

На нем приведены диаграммы продольных и поперечных деформаций для исследованного в работе гранита и показаны характерные участки диаграмм. Первый участок характеризует закрытие изначально присутствующих в образце микротрещин, второй — упругое деформирова-

ние материала, третий — начало образования новых трещин в образце, четвертый — нестабильное трещинообразование, которое завершается полным разрушением образца. Упругие свойства материала должны определяться на втором участке диаграмм. Нагружение образца за пределом упругости сопровождается накоплением повреждений, трещин, изменением структуры порового пространства и приводит к изменению его физико-механических свойств. При этом нарушается принцип обратимости: материал не возвращается в исходное состояние после снятия нагрузки даже при неизменных условиях испытания.

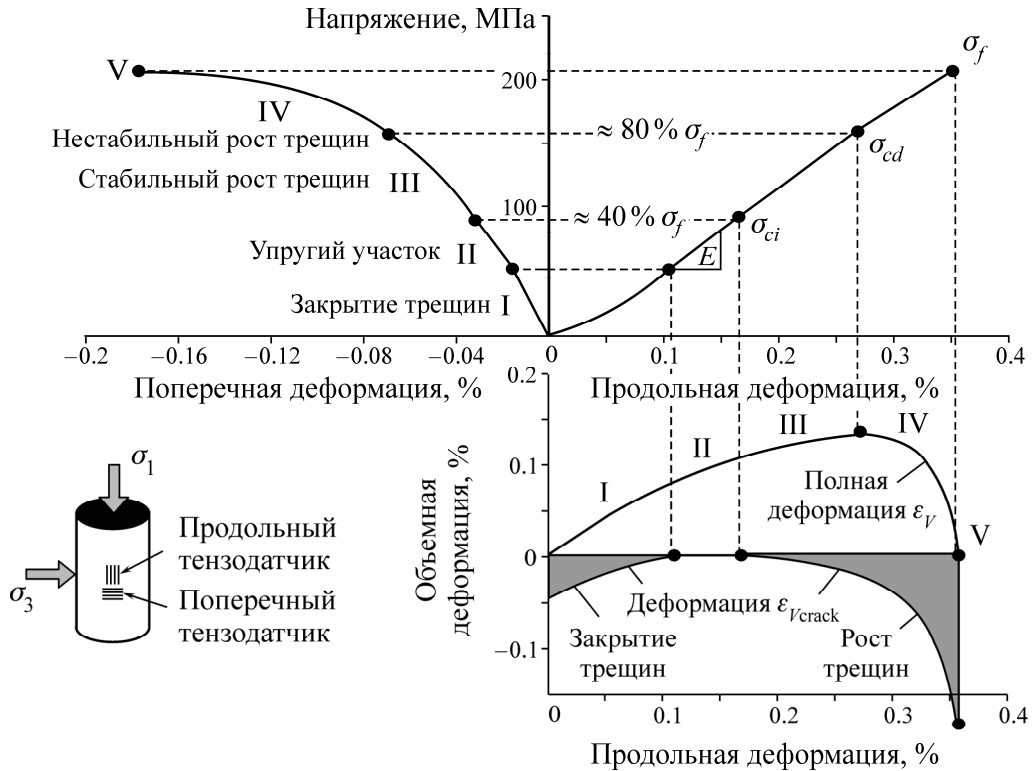


Рис. 3. Характерные участки диаграмм деформирования горных пород (по [2])

Для установления нижней и верхней границ упругого участка авторы предлагают проследить за изменением объемной деформации  $\varepsilon_V$  образца за вычетом ее упругой составляющей  $\varepsilon_{Velastic}$ . Эту деформацию  $\varepsilon_{Vcrack}$  они связывают с образованием и закрытием микротрещин:

$$\varepsilon_{Vcrack} = \varepsilon_V - \varepsilon_{Velastic}.$$

Критерий определения границ упругого участка очень прост: деформация  $\varepsilon_{Vcrack}$  в пределах этого участка должна обращаться в нуль (рис. 3), поскольку изменение объема образца на нем происходит только за счет упругого деформирования.

Деформацию  $\varepsilon_V$  рассчитывают по данным измерения продольной и поперечной деформаций образца:

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V} \approx \varepsilon_a + 2\varepsilon_l,$$

а деформацию  $\varepsilon_{Velastic}$  — по формуле

$$\varepsilon_{Velastic} = \frac{1-2\nu}{E} \sigma,$$

где  $E$  — модуль Юнга,  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Описанный метод содержит очевидный недостаток, связанный с тем, что для определения границ упругого участка необходимо заранее знать упругие свойства  $E$  и  $\nu$ . Кроме того, по данным измерений не всегда удается получить выраженный линейный участок  $\varepsilon_{Vcrack} = 0$ . Причина может быть связана не столько с нелинейным поведением материала, сколько с недостаточной точностью измерения малых деформаций. Это относится прежде всего к измерению поперечных деформаций. На практике метод применяют только для оценки верхней границы упругого участка.

В работе [4] для более четкого и объективного выявления характерных участков диаграммы деформирования предложено рассматривать не саму диаграмму, а ее первую производную. В зависимости от того, какая диаграмма деформирования берется (диаграмма продольных или поперечных деформаций), ее производная характеризует соответствующий модуль деформации или жесткость образца в данном направлении. Таким же образом можно рассмотреть изменение объемной жесткости, если по данным измерения продольных и поперечных деформаций построить диаграмму объемной деформации.

Для построения диаграммы жесткости использовали исходные (измеренные) значения деформаций, без предварительного сглаживания диаграммы деформирования. Сглаживание (усреднение) результатов конечноразностного дифференцирования осуществлялось за счет выбора интервала дифференцирования, охватывающего несколько точек измерений слева и справа от рассматриваемой точки, и использования линейной аппроксимации диаграммы в пределах выбранного интервала. Процедура повторялась при переходе к следующей точке диаграммы деформирования. Размер интервала дифференцирования составлял приблизительно 5% от общего числа точек.

Проанализировав полученные таким образом диаграммы продольной, поперечной и объемной жесткости, авторы заключили, что характерные участки наилучшим образом могут быть выявлены на диаграмме объемной жесткости в зависимости от величины приложенного напряжения. Типичный пример такой диаграммы для образца розового гранита приведен на рис. 4. Деформации образца измеряли с помощью тензодатчиков, наклеенных на его поверхность. Значения напряжений на нижней и верхней границе упругого участка составили 20 и 35% от предела прочности при сжатии соответственно.

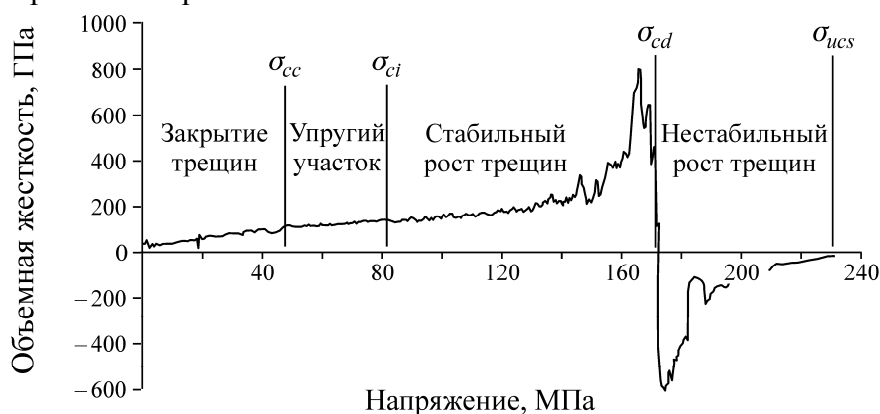


Рис. 4. Диаграмма объемной жесткости (по [4])

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСТЕНЗОМЕТРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Для определения продольной деформации  $\varepsilon_a$  необходимо измерять перемещения точек образца величиной 50–100 мкм (изменение базы датчика  $\Delta L$ ), что особых трудностей не вызывает. Наиболее сложной с технической точки зрения задачей является измерение с достаточной

точностью малых (1 – 10 мкм) поперечных перемещений точек образца горной породы для расчета коэффициента Пуассона. Так, фирмы MTS и Instron предлагают для измерения поперечных деформаций цилиндрических образцов окружные экстензометры, а фирма Toni Technik — диаметральные. Кроме того, фирма Toni Technik предлагает датчики прямого действия с магнитным креплением к образцу для измерения деформаций призматического образца в продольном и поперечном направлениях.

Наибольшее распространение получили окружные экстензометры в силу простоты работы с ними и возможности установки на образцы керна. На рис. 5 показан эталонный алюминиевый образец с окружным экстензометром 632.11 фирмы MTS.

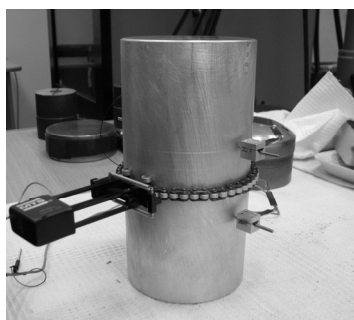


Рис. 5. Эталонный алюминиевый образец

Датчик представляет собой гибкую цепочку, охватывающую образец, крайние звенья которой соединены с сенсором. Крепление датчика на образце осуществляется независимо от датчиков продольной деформации, путем натяжения цепочки пружинами. Перемещения образца передаются на сенсор через цепочку, состоящую из большого числа звеньев, каждое из которых представляет собой промежуточный элемент со свободным ходом (люфтом) и трением. Из-за конструктивных особенностей характеристика окружного датчика при малых перемещениях образца имеет нелинейный характер. По той же причине диаграмма деформирования при разгрузке демонстрирует выраженный гистерезис, никак не связанный с реальным поведением материала. На рис. 6 приведена диаграмма изменения окружности  $\Delta S$  эталонного алюминиевого образца диаметром 90 мм при сжатии, полученная с помощью окружного датчика на испытательной машине MTS 815. Видно, что диапазон работы окружного датчика начинается от 10 мкм, для измерения меньших перемещений он не может быть использован.

Рассмотрим особенности работы диаметральных датчиков фирмы Toni Technik, которые имеют одинаковую конструкцию, но рассчитаны на испытания образцов различного диаметра: датчик 0712.012 — для испытания образцов диаметром от 90 до 160 мм, а датчик 0712.013 — для испытания образцов диаметром от 40 до 100 мм. Оба датчика могут использоваться только совместно с продольным датчиком 0712.001. На рис. 7 приведены фотографии датчика 0712.012 отдельно и в сборе с датчиком 0712.001.

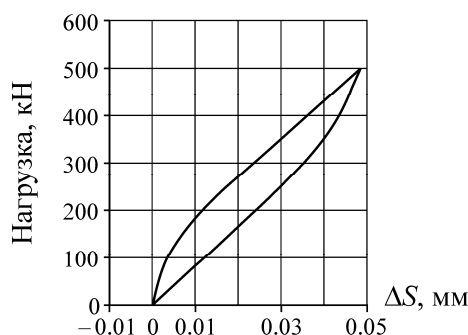


Рис. 6. Диаграмма изменения окружности алюминиевого образца

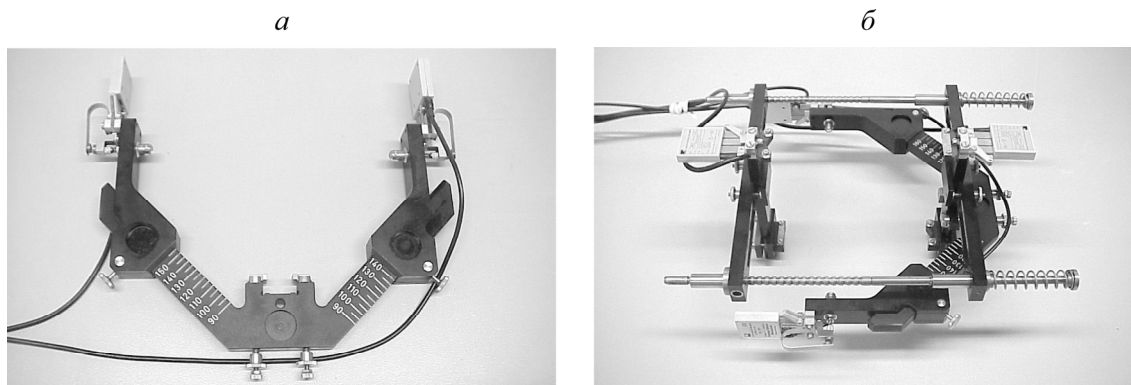


Рис. 7. Датчик 0712.012 фирмы Toni Technik: *а* — отдельно; *б* — в сборе с датчиком 0712.001

Для установки на образец датчик 0712.012 жестко крепится к датчику 0712.001. Однако такой способ крепления не может обеспечить полной независимости работы продольного и поперечного датчиков. Но если влияние поперечного датчика на работу продольного незначительно, то обратное влияние может оказаться настолько существенным, что приведет к значительному искажению диаграммы поперечных деформаций. Важную роль при этом играют два фактора: расположение поперечного датчика относительно неподвижной опоры продольного и трение во втулке при перемещении штока, который деформацию образца передает на сенсор. При неблагоприятном наложении этих факторов диаграммы поперечных деформаций (перемещений) имеют вид, представленный на рис. 8*б*. Стальной образец дважды нагружали в упругой области и получили диаграммы поперечных перемещений, не отражающие реальное линейно-упругое деформирование материала, о котором можно судить по диаграммам продольных перемещений (рис. 8*а*).

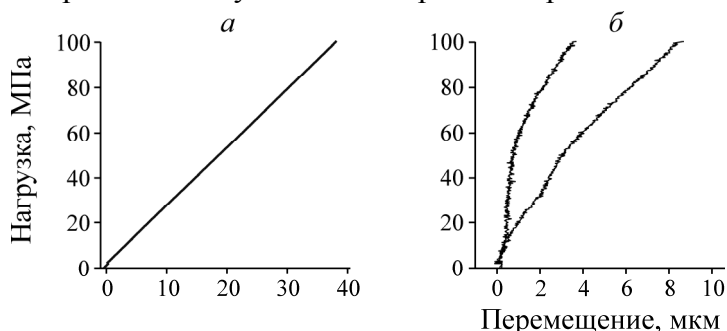


Рис. 8. Диаграммы изменений продольных (*а*) и поперечных (*б*) перемещений точек образца из стали в зависимости от приложенной нагрузки

Для изучения возможности использования диаметральных датчиков проведены испытания эталонного алюминиевого образца, по результатам которых [7] сделан вывод о том, что для минимизации взаимного влияния продольного и диаметрального датчиков последний необходимо устанавливать максимально близко к неподвижной опоре продольного. Но и при выполнении этого условия разброс значений коэффициента Пуассона, полученных в нескольких сериях испытаний на сжатие эталонного образца, составил до 20%. Погрешность определения коэффициента Пуассона реальных горных пород при использовании диаметральных датчиков деформаций фирмы Toni Technik может оказаться значительно выше достигнутого разброса значений на эталонном образце.

Единственная возможность корректного измерения малых поперечных деформаций — использовать датчики, в которых перемещения образца передаются непосредственно на чувствительный элемент (прямой способ измерения перемещений). Примером может служить датчик

0712.004 фирмы Toni Technik, в котором имеется магнитное крепление к плоскости призматического образца, тип сенсора DD1. Этот датчик может применяться для определения как продольных, так и поперечных деформаций образца. На рис. 9 показан образец, на различные грани которого в продольном и поперечном направлении установлены датчики 0712.004.

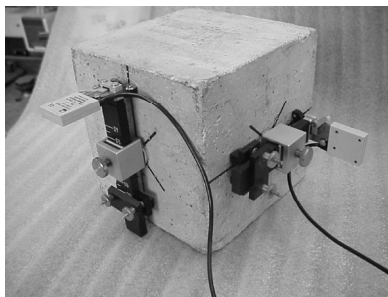


Рис. 9. Датчики 0712.004 фирмы Toni Technik для измерения вертикальных и горизонтальных смещений

Датчики 0712 устанавливают, как правило, парами на противоположные грани образца, а для расчета деформаций используют их усредненные показания. Это позволяет уменьшить погрешности измерений, связанные с изгибом образца из-за непараллельности нагружаемых граней или расположения образца не строго в центре нажимной плиты, что особенно важно при испытании высоких призматических образцов. Для установки продольных датчиков также применяется пружинное крепление. Такие датчики имеют обозначение 0712.001.

На рис. 10 приведены диаграммы продольных и поперечных перемещений образца известняка, полученные с помощью датчиков 0712.001 и 0712.004. Призматический образец имел размеры  $145 \times 52 \times 52$  мм. База измерения продольного датчика составляла 80 мм, поперечного — 45 мм.

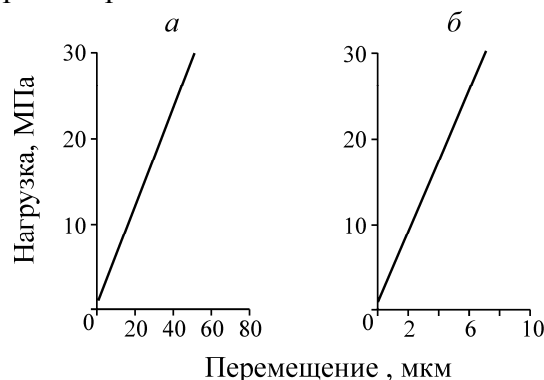


Рис. 10. Схематичное поведение диаграмм продольных (а) и поперечных (б) перемещений точек образца известняка в зависимости от приложенной нагрузки

Каждая диаграмма получена по результатам измерений на трех циклах нагружения, т. е. фактически состоит из трех кривых, наложенных друг на друга. По этим диаграммам можно судить о линейно-упругом характере деформирования материала в заданном диапазоне нагружения и о корректности работы датчиков деформаций. Заметим, что максимальное перемещение, измеренное с помощью поперечного датчика 0712.004, составило всего 7 мкм, а порог чувствительности датчика — 0.01 мкм.

Таким образом, использование датчиков 0712.004 совместно с датчиками 0712.001 фирмы Toni Technik позволяет корректно и с высокой точностью определять упругие свойства горных пород при одноосном сжатии. Однако при этом возникает необходимость обеспечения достаточно высоких требований по плоскостности и параллельности граней призматического образца, что ведет к существенному увеличению затрат на его изготовление и подготовку к испытанию.



## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА

Проведенный анализ существующих стандартных методов определения упругих свойств горных пород при одноосном сжатии показал, что в наибольшей степени требованиям физической корректности отвечает стандарт DIN EN 14580. В нем содержатся два принципиальных момента, отличающих его от ASTM D7012-10 и ГОСТ 28985-91. Во-первых, максимальная нагрузка ограничена 33 % от  $\sigma_c$ , а во-вторых, проведению испытания предшествует обязательное уплотнение образца. Соблюдение этих требований обеспечивает обратимое упругое деформирование образца во время испытания. Однако, как уже отмечалось, этот стандарт разработан только с целью определения модуля упругости. Для определения коэффициента Пуассона необходимо решить вопрос с достоверным установлением нижней границы упругого участка и надежной регистрацией малых поперечных деформаций.

Опыт показывает, что соблюдение (с необходимой для расчетов точностью) линейности и обратимости деформирования в продольном направлении не всегда автоматически обеспечивает такой же характер деформирования в поперечном направлении. Нижняя граница линейного участка, установленная DIN EN 14580 (2 % от  $\sigma_c$ ) для диаграммы продольных деформаций, как правило, находится значительно ниже, чем нижняя граница линейного участка диаграммы поперечных деформаций. Поэтому верхнюю и нижнюю границы диапазона нагружения, на которых проводится измерение деформационных перемещений образца, необходимо выбирать исходя из характера диаграммы как продольных, так и поперечных деформаций. Для измерения деформаций предпочтительно использовать экстензометры прямого действия.

С помощью продольного датчика 0712.001 и поперечного датчика 0712.004 фирмы Toni Technik проведены испытания на одноосное сжатие и получены диаграммы деформирования вмещающих пород алмазных месторождений Якутии (доломиты, известняки, песчаники, алевролиты). На основе анализа полученных, а также литературных данных предложено нижнее напряжение  $\sigma_u$  принимать равным 0.5 от верхнего напряжения  $\sigma_o$ , установленного DIN EN 14580.

С учетом этого разработан метод расчета статического модуля упругости и коэффициента Пуассона, позволяющий физически корректно определять упругие характеристики горных пород, в том числе при изменении их температуры. На его основе в соответствии с [8–10] разработан стандарт организации СТО 05282612-001-2013 “Метод определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при одноосном сжатии призматических образцов”. В настоящее время стандарт утвержден и введен в действие в ИГД Севера.

Для испытания образцов горных пород используется следующее оборудование: испытательный пресс ToniNORM с блоком измерительной и управляющей электроники ToniTROL (фирма Toni Technik, Германия) и электромеханическая универсальная испытательная машина UTS 250 с блоком измерительной и управляющей электроники testControl (фирма Zwick, Германия). Машина UTS 250 может быть оснащена температурной камерой для проведения испытаний в диапазоне температур от –65 до +250°C.

Отбор проб для изготовления образцов проводят по ГОСТ 28985-91 [1]. Для испытания изготавливают призматические образцы квадратного сечения со стороной  $50 \pm 2$  и высотой  $150 \pm 5$  мм. Образцы вырезают на камнерезной машине из штуфов или кернов. Торцевые и боковые поверхности образцов шлифуют на шлифовальной машине.

На образец устанавливают продольные и поперечные экстензометры. Используют датчики деформаций 0712.001 и 0712.004 фирмы Toni Technik. Для повышения точности измерений на противоположные боковые грани образца крепят по два продольных и поперечных датчика. Для расчета деформаций образца во время испытания берутся усредненные показания каждой

пары экстензометров. Экстензометры подключают к блоку измерительной и управляющей электроники испытательной машины (пресса). Образец с установленными экстензометрами размещают в центре нижней опорной плиты испытательной машины.

Работа испытательной машины и регистрация результатов измерений осуществляются с помощью компьютера по программе testXpert. Испытание проводится путем многократного нагружения образца в диапазоне малых обратимых деформаций. Для определения упругих свойств нижнее напряжение  $\sigma_u$  принимается равным 0.5 от верхнего  $\sigma_o$ . При этом верхнее напряжение не должно превышать одной трети от предела прочности материала при одноосном сжатии, который рассчитывается предварительно в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 [11].

Процедура определения упругих свойств горных пород при низких климатических температурах выглядит следующим образом. Образец с установленными датчиками помещают в температурную камеру и охлаждают до заданной температуры. Полагают, что заданная температура достигнута, если показания продольного датчика стабильны (с точностью 0.1 мкм) в течение не менее 30 мин. Общее время охлаждения и выдержки образца при заданной температуре составляет 2–3 ч.

После охлаждения образец несколько раз подвергают циклическому нагружению со скоростью 1 МПа/с до напряжения  $\sigma_o$ . Первые 1–2 цикла необходимы для предварительного уплотнения образца перед измерением деформаций. На последующих циклах проводится проверка условия обратимости и линейности деформаций и их измерение. Для расчета модуля упругости и коэффициента Пуассона используют средние значения деформаций, полученные на последующих циклах нагружения, что позволяет повысить точность измерения малых деформаций и определения упругих свойств материала.

В процессе испытания с интервалом 0.1 с регистрируют изменение базы продольного и поперечного датчиков и рассчитывают соответствующие деформации образца. Модуль упругости вычисляют по формуле (1), а коэффициент Пуассона — по формуле

$$\nu = \frac{(\varepsilon_l)_u - (\varepsilon_l)_o}{(\varepsilon_a)_o - (\varepsilon_a)_u}, \tag{2}$$

где  $(\varepsilon_l)_u$  и  $(\varepsilon_l)_o$  — измеренные поперечные деформации при нижнем и верхнем напряжении. Затем образец охлаждают (или нагревают) до новой температуры и повторяют испытание.

Разработанный метод использовался для определения упругих свойств вмещающих пород алмазных месторождений Якутии при изменении температуры. Такие данные необходимы для проектирования горных сооружений в условиях криолитозоны, в которой располагаются указанные месторождения. В качестве примера рассмотрим результаты испытаний образцов известняка и алевролита (трубка “Ботуобинская”) в диапазоне температур от +20 до –40°C. На рис. 11 приведены изменения модуля Юнга и коэффициента Пуассона в зависимости от температуры. Видно, что с понижением температуры образца модуль упругости образцов линейно возрастает, в то время как коэффициент Пуассона остается постоянным.

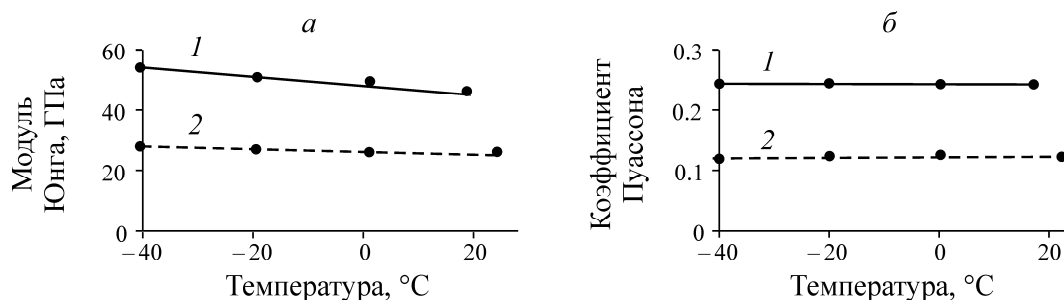


Рис. 11. Зависимость от температуры: а — модуля Юнга; б — коэффициента Пуассона для образцов известняка (1) и алевролита (2)

## ВЫВОДЫ

На основе проведенного анализа методов определения упругих свойств горных пород при одноосном сжатии показано, что в наибольшей степени требованиям физической корректности отвечает стандарт DIN EN 14580, в котором обеспечивается обратимое упругое деформирование образца во время испытания. Однако он разработан только с целью определения модуля упругости.

Конструкция окружных и диаметральных экстензометров не обеспечивает надежную регистрацию малых перемещений в диапазоне 1–10 мкм, что существенно ограничивает область их применения для регистрации поперечных перемещений точек образца и определения коэффициента Пуассона материала при сжатии. Для этих целей предпочтительно использовать датчики “прямого действия”, в которых перемещения точек образца передаются непосредственно на чувствительный элемент.

Разработан метод расчета статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при одноосном сжатии призматических образцов и стандарт организации на его основе, позволяющие физически корректно определять упругие свойства пород при изменении их температуры, в частности при переходе из талого состояния в мерзлое. Это имеет важное практическое значение при проектировании горных сооружений в условиях криолитозоны и применении геотехнологий с замораживанием породного массива.

В соответствии с разработанным стандартом определены упругие свойства вмещающих пород на месторождении алмазов трубки “Ботуобинская” в диапазоне температур от +20 до –40°C. Отмечено, что с понижением температуры наблюдается линейное увеличение модуля упругости при сохранении постоянного значения коэффициента Пуассона.

Автор выражает благодарность А. И. Рукавишникову за помощь в подготовке образцов и проведении испытаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 28985-91.** Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. — 11 с.
2. **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.
3. **Hakala M., Kuula H., and Hudson J. A.** Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties for in situ stress measurement data reduction: A case study of the Olkiluoto mica gneiss, Finland, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2007, Vol. 44, No. 1. — P. 14 – 46.
4. **Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., and Read R. S.** Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock, *Can. Geotech. J.*, 1998, Vol. 35, No. 2. — P. 222 – 233.
5. **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. — 9 p.
6. **DIN EN 14580:2005-07.** Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2005. — 15 p.
7. **Сукнев С. В.** Использование окружных и диаметральных датчиков деформаций для определения коэффициента Пуассона при сжатии // ГИАБ. — 2012. — № 12. — С. 22 – 27.
8. **ГОСТ Р 1.0-2004.** Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2007. — 12 с.
9. **ГОСТ Р 1.4-2004.** Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2007. — 8 с.
10. **ГОСТ Р 1.5-2004.** Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения. — М.: Стандартинформ, 2007. — 35 с.
11. **ГОСТ 21153.2-84.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. — 8 с.