ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 166 1969

О ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТАМИ АНИЗОТРОПИИ УПРУГИХ И ТЕПЛОПРОВОДНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Ю. Л. БОЯРКО

(Представлена научным семинаром кафедры техники разведки)

Горные породы в большинстве своем обладают анизотропией (неравенством свойств по различным направлениям внутри исследуемого тела), что обуславливается определенной ориентированностью слагающих их минералов.

Анизотропность механических свойств горных пород отмечается рядом исследователей, которые занимались изучением физико-механических свойств горных пород, а также учитывается и используется в горнодобывающей и камнеобрабатывающей промышленности. Например, известно, что анизотропные породы легко раскалываются в одном направлении — по сланцеватости, а бурятся намного легче в другом направлении — перпендикулярно сланцеватости. Последнее качество, а именно легкость бурения в направлении перпендикуляра к сланцеватости или слоистости, по сравнению с направлением параллельным сланцеватости или слоистости учитывается в настоящее время едиными нормами времени на бурение (ЕНВ на буровые работы, 1963 г.) путем применения коэффициентов. Авторы ЕНВ учитывают снижение скорости бурения скважин с ростом угла падения горных пород и увеличивают нормы времени путем введения поправочного коэффициента, имеющего численные значения от 1,05 до 1,20, который зависит также и от категории породы по буримости. Однако из наблюдений и исследований ряда авторов вытекает такое положение, что анизотропия твердости находится в большой зависимости от степени динамометаморфизма [5]. Чем более метаморфизованы горные породы, тем ярче выражена анизотропия ряда свойств этих пород.

В табл. 1, например, приводятся данные, полученные автором при исследованиях по определению буримости горной породы в различных направлениях относительно слоистости или сланцеватости, которые были произведены в лабораторных условиях.

Анализ данных табл. 1 показывает, что разница в буримости по различным направлениям относительно плоскости сланцеватости весьма различна и зависит от степени метаморфизма пород. Так слюдистые сланцы, гранитогнейс и амфиболит, содержащие в себе высокотемпературные безводные минералы, относятся к сильно метаморфизованным породам. Соответственно буровой показатель анизотропии у них очень высок. Аргиллиты, глинистые сланцы и каменный уголь относятся к слабо или почти неметаморфизованным породам. Буровой показатель анизотропии у них соответственно низкий.

В связи с этим введение общего поправочного коэффициента в нормы времени на бурение, учитывающего величину угла встречи оси скважины с плоскостью сланцеватости, является только первым шагом на пути совершенствования норм выработки и времени в этом направлении.

Таблица 1

Наименование и краткая характеристика горной породы	Скорость бурения в направлениях		Буровой показатель анизотропии $A_б = \frac{V_\perp}{V_\parallel}$
	перпендикулярно сланцеватости $V_\perp$, *см/мин*	параллельно сланцеватости $V_\parallel$, *см/мин*	
Гранитогнейс биотитовый (Урал)	2,00	1,25	1,60
Амфиболитплагиоклазовый (Урал)	2,75	2,00	1,40
Мрамор кристаллический (Горная Шория) . . .	3,00	2,50	1,20
Сланцы слюдистые (Рудный Алтай)	4,50	2,40	1,80
Аргиллит рассланцованный (Кузбасс)	8,00	6,00	1,33
Аргиллит слоистый (Кузбасс)	8,25	6,50	1,27
Сланцы слюдистые (Рудный Алтай)	9,00	3,00	3,00
Глинистый сланец (Томская область)	11,00	9,50	1,15
Каменный уголь (Кузбасс)	16,50	14,00	1,18

Анизотропия твердости горных пород, кроме того, оказывает огромное влияние на искривление скважин, о чем имеются опубликованные материалы [2, 3].

Все это говорит о том, что при разведке месторождений необходимо тщательно изучать механические свойства горных пород с точки зрения их анизотропности, чтобы затем использовать эти данные в борьбе с искривлением скважин, в направленном бурении, в определении фактической буримости пород.

Анизотропия механических свойств горных пород характеризуется различием таких показателей, как модуль Юнга, коэффициент Пуассона и др., при определении их по различным направлениям в образцах относительно плоскости сланцеватости. Чаще всего за показатель анизотропии механических свойств принимают отношение модуля Юнга, определенного в породе вдоль плоскости сланцеватости E_{II}, к модулю Юнга, определенного в направлении, перепендикулярном сланцеватости $E_\perp$ [7].

Но определение модуля Юнга и других физико-механических показателей горных пород связано со значительными трудностями, так как требует для своего осуществления весьма оснащенную лабораторную базу и по затратам времени довольно трудоемко. Достаточно сказать, что при любом методе определения модуля упругости — статическом или динамическом, необходимо изготовить образцы специальной формы

и размеров, что часто затруднительно. Особенно затруднительно проводить подобные определения в полевых условиях.

Однако, когда речь идет об определении только показателя анизотропии механических свойств горных пород или, как его еще можно назвать, коэффициента упругой анизотропии $A_м = \frac{E_{II}}{E_{\perp}}$, можно использовать другие векторные свойства горной породы, методика определения которых во много раз проще, а затем установить между ними корреляционную или аналитическую зависимость.

К векторным или, как еще их называют, тензорным свойствам горных пород относится, например, теплопроводность. В том случае, если необходимо определить лишь коэффициент анизотропии теплопроводности горной породы, достаточно провести следующие операции. Образец горной породы, взятый из керна, полученного в скважине или с забоя выработки, зашлифовывается по площади, перпендикулярной сланцеватости, слоистости или каким-либо другим S-поверхностям. Затем эта площадка нагревается до температуры 70—90°С и покрывается тонким слоем расплавленного парафина. После охлаждения образца до обычной температуры к шлифованной площадке плотно прижимается подогретый металлический стержень (лучше всего использовать электропаяльник) со сферическим наконечником. Делается выдержка в 3—5 минут, в результате чего порода прогревается в месте соприкосновения с металлом и расходящееся по ней тепло плавит парафин. Если порода анизотропна, то распространение тепла происходит во все стороны с различной скоростью. Быстрее тепло распространяется в направлении большей плотности. В результате на поверхности образуется эллипс расплавившегося парафина (рис. 1). Замеряется длина осей эллипса. Отношение длины одной оси к другой дает коэффициент анизотропии теплопроводности породы. Связь же его с коэффициентом упругой деформации следующая.

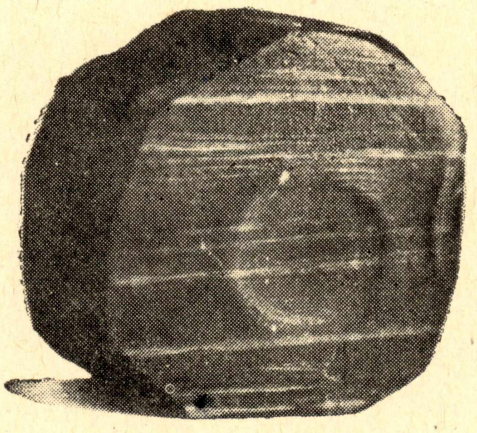

Рис. 1. Эллипс теплопроводности на поверхности исследуемого образца анизотропной породы

Все тепловые свойства твердых неметаллических тел, согласно теории Дебая, можно связать с системой акустических стоячих волн, скорость распространения которых зависит от модуля упругости рассматриваемой среды [6].

Установив аналогию между молекулярной передачей тепла в газах и теплопроводностью в твердых неметаллических телах при помощи фононов, Дебай вывел уравнение

$$\lambda = 1/4\, c \cdot u \cdot \overline{l}, \qquad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности,

c — теплоемкость,

u — скорость звука,

$\overline{l}$ — средняя длина свободного пробега фононов.

Это уравнение применимо как к кристаллическим, так и к аморфным неметаллическим материалам.

С другой стороны [2], коэффициент теплопроводности определяется уравнением

$$\lambda = a \cdot \rho \cdot c, \tag{2}$$

где a — коэффициент температуропроводности,
ρ — плотность,
c — теплоемкость,

Для случая анизотропного материала имеем

$$\left.\begin{aligned} \lambda_{\parallel} &= 1/4 \cdot c \cdot u_{\parallel} \cdot \bar{l}_{\parallel} \\ \lambda_{\perp} &= 1/4 \cdot c \cdot u_{\perp} \cdot \bar{l}_{\perp} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

$$\left.\begin{aligned} \lambda_{\parallel} &= a_{\parallel} \cdot \rho \cdot c \\ \lambda_{\perp} &= a_{\perp} \cdot \rho \cdot c \end{aligned}\right\}, \tag{4}$$

где величины c и ρ являются сколряными, а величина λ, u, c и a — векторными, т. е. зависящими от направления их определения.

Скорость движения звуковых колебаний в породе определяется из уравнения [4]

$$u = \sqrt{\frac{\overline{E}}{\rho}}, \tag{5}$$

где E — модуль Юнга,
ρ — плотность породы.

Для анизотропной среды имеем

$$\left.\begin{aligned} u_{\parallel} &= \sqrt{\frac{\overline{E_{\parallel}}}{\rho}} \\ u_{\perp} &= \sqrt{\frac{\overline{E_{\perp}}}{\rho}} \end{aligned}\right\}. \tag{6}$$

Используя исходные уравнения (1), (2) и (5), можем записать

$$\lambda = 1/4 \cdot \sqrt{\frac{\overline{E}}{\rho}} \cdot c \cdot l,$$

откуда

$$E = \frac{16 \cdot \lambda^2 \cdot \rho}{c^2 \cdot \bar{l}^2},$$

или, заменяя λ через выражение (2),

$$E = \frac{16 \cdot a^2 \cdot \rho^3}{\bar{l}^2}. \tag{7}$$

Для анизотропной среды, используя уравнения (3), (4), (6), можем записать отношение

$$\frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} = \frac{\bar{l}_{\parallel}^2 \cdot a_{\perp}^2}{\bar{l}_{\perp}^2 \cdot a_{\parallel}^2}. \tag{8}$$

Скорость распространения тепловой волны зависит от ряда факторов, таких как теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность и пр.

В данном случае нас интересуют только те факторы, которые обладают векторными свойствами, т. е. имеют различную величину в одном и том же анизотропном образце при определении их по различным направлениям. В уравнении (7) такими свойствами обладают температуропроводность a и средняя длина свободного пробега фононов $\bar{l}$.

В связи с тем, что в задачу способа входит определение только коэффициента анизотропии механических свойств пород, используя описанную и теоретически обоснованную связь теплопроводности с модулем Юнга, можем заменить произведение $l_{II}^2 \cdot a_{\perp}^2$ через $\Theta_{\perp}$ и произведение $l_{\perp}^2 : a_{II}^2$ черезе Θ_{II}, назвав Θ векторным показателем теплопроводности породы.

Таким образом, получаем уравнение

$$\frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} = \frac{\Theta_{\perp}}{\Theta_{\parallel}}. \qquad (9)$$

Определить же величины $\Theta_{\perp}$ и Θ_{II} в безразмерных единицах можно, замерив длину осей или полуосей эллипса, получающегося на образце при плавлении парафина, и возведя эти величины в квадрат.

Результаты экспериментального определения коэффициентов анизотропии приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование горной породы	Коэффициент анизотропии теплопроводности A_T	$A_T^2 = \frac{\Theta_{\perp}}{\Theta_{\parallel}}$	Коэффициент упругой анизотропии $A_M = \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}}$
Глинистый сланец . . .	1,20	1,44	1,45
Амфиболит	1,17	1,37	1,39
Доломит	1,12	1,26	1,28
Кварцит	1,01	1,02	1,01
Каменный уголь	1,07	1,15	1,19
Метаморфический сланец	1,17	1,37	1,39
Песчаник	1,05	1,10	1,11
Алевролит	1,05	1,10	1,12
Аргиллит	1,12	1,26	1,28

Исследуемые образцы горных пород должны быть обязательно объемными, так как способ основан на применении точечного источника, тепла, образующего в исследуемом образце объемный радиальный тепловой поток. В изотропных породах такой поток распространяется в виде полусферы с радиусом R и на шлифованной поверхности при плавлении парафина образуется круг с радиусом R.

В анизотропных породах изотермическая поверхность теплового потока имеет форму полуэллипсоида. Для большинства анизотропных пород справедливо то положение, что два взаимно перпендикулярных вектора, характеризующих теплопроводность в плоскости, параллельной сланцеватости, равны между собой, т. е. $\lambda_{II}' = \lambda_{II}''$. Однако практика исследований показывает, что часть пород, имеющих так называемую трахитовую текстуру, анизотропна по всем направлениям, и для них справедливо следующее выражение

$$\lambda_{\perp} \neq \lambda_{\parallel}' \neq \lambda_{\parallel}''.$$

Для исследования анизотропных пород, характеризующихся равенством $\lambda_{II}' = \lambda_{II}''$ и называемых транстропными, достаточно зашлифовать

одну плоскость, перпендикулярную плоскости сланцеватости. При этом толщина образца должна быть несколько больше малой полуоси эллипса, получаемого на шлифованной поверхности при плавлении парафина. В противном случае (в случае применения тонкой пластинки) правильная геометрическая форма изометрической поверхности нарушится и за счет искаженного распределения тепла появятся погрешности в эллипсе на шлифованной поверхности.

Нагреватель должен иметь сферическую поверхность с минимальным радиусом сферы (1—1,5 *мм*), чтобы уменьшить погрешности, возникающие за счет дополнительного нагрева исследуемой поверхности от конвекции и излучения со стороны нагревателя.

Для исследования ортотропных пород ($\lambda_{\perp} \neq \lambda'_{\parallel} \neq \lambda''_{\parallel}$) необходимо шлифовать три взаимно перпендикулярные стороны, причем одна из плоскостей должна быть перпендикулярна как сланцеватости, так и линейности породы.

Погрешности, получаемые при измерении осей эллипсов, а также при определении модуля Юнга на прессе, дают некоторую разницу коэффициентов анизотропии, что видно из табл. 2. Однако для полевого метода такая сходимость вполне достаточна. Кроме того, точность измерения может быть повышена при дальнейшем совершенствовании методики исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Барон и др. Определение свойств горных пород. Госгортехиздат, 1962.
2. Ю. Л. Боярко. Механика разрушения забоя в анизотропных породах и процесс искривления скважин в них. Изв. ТПИ, т. 120, 1962.
3. А. Г. Калинин. Искривление буровых скважин. Госгеолтехиздат, 1963.
4. Под редакцией Ю. А. Нелендера. Ультразвук в строительной технике. Госстройиздат, 1962.
5. Ю. А. Розанов. Влияния макроструктурных особенностей горных пород на анизотропность их механических свойств. Тр. ин-та геол. наук, АН СССР, вып.146, петрографическая серия (№42) 1952.
6. В. С. Чиркин. Теплопроводность промышленных материалов. Машгиз, 1962.
7. Н. И. Шацов и др. Бурение нефтяных и газовых скважин. Гостоптехиздат, 1961.
8. С. Н. Шорин. Теплопередача. Высшая школа, 1964.