УДК 534.6.08: 691.212: 53.092: 620.173.2: 620.179.16: 622.833/.838

В.М.ЦАПЛЕВ, *д-р техн. наук, профессор, valery@convergences-fr.ru*
Р.М.ИВАНЮК, *аспирант, rivanyuk@phosagro.ru*
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)
В.В.ЗВЕРЕВИЧ, *канд. техн. наук, доцент, kmd@spmi.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

V.M.TSAPLEV, *Dr. in eng. sc., professor, valery@convergences-fr.ru*
R.M.IVANYUK, *post-graduate student, rivanyuk@phosagro.ru*
Saint-Petersburg State Electrotechnical University (LETI)
V.V.ZVEREVICH, *PhD in eng. sc., associate professor, kmd@spmi.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Рассматривается ультразвуковой метод исследования упругой ползучести поликристаллических горных пород под действием постоянного механического напряжения. Исследования выполнялись при помощи оригинальной установки ультразвуковым методом нагруженного составного вибратора. Предложена теория метода, выполнены измерения для поликристаллического хибинита. Показаны преимущества данного метода перед традиционными для изучения физических механизмов, ответственных за ползучесть.

Ключевые слова: поликристаллические горные породы, нелинейная упругость, ползучесть, ультразвуковой контроль, статическое сжатие, ультразвуковой метод, нагруженный составной вибратор.

ULTRASONIC STUDY OF CREEP IN POLYCRYSTALLINE ROCKS

The influence of the uniaxial static stress on creep in the polycrystalline rocks was studied. The study was performed using the original method of loaded complex oscillator. The theory of the method is proposed, The measurements were performed for polycrystalline khibinite. The advantages of the method before traditional methods for studying of physical mechanisms of creep are demonstrated.

Key words: polycrystalline rocks, nonlinear elasticity, creep, ultrasonic control, static stress, ultrasonic method, loaded complex oscillator.

Ползучесть, т.е. изменение во времени свойств материала после некоторого воздействия, является свойством, присущим всем без исключения материалам. Обычно под ползучестью понимают изменение во времени механических характеристик, т.е. деформации при приложении постоянного или меняющегося во времени напряжения, или наоборот – изменение напряжения при постоянной деформации. В общем случае могут меняться (и меняются) не только механические, но и другие характеристики материала: диэлектрические, магнитные и др. Ползучесть обусловлена дефектностью структуры материала, т.е. наличием точечных или протяженных дефектов – как макроскопических, так и микроскопических. Поскольку во времени меняется структура материала, ползучесть представляет собой нелинейный процесс – меняются во времени модули упругости, пьезоэлектрические (для пьезоэлектриков), магнитные (для магнетиков) свойства и т.д. Кроме того, следует иметь в виду, что процесс изменения параметров во

времени обусловлен широким спектром физических процессов, протекающих при этом. Каждый такой процесс характеризуется своим значением энергии активации и своим значением характерного времени, т.е. времени релаксации.

Из всего этого следует, что точность регистрации параметра, меняющегося во времени в процессе ползучести, имеет первостепенное значение. Несмотря на то, что исследованием ползучести очень давно занималось и занимается огромное число исследователей и этому свойству посвящено большое число научных работ, вопрос о точности остается актуальным. Среди обобщающих монографий на тему ползучести минералов и горных пород (а также металлов и керамики) следует отметить фундаментальную работу Ж.-П.Пуарье [1]. Экспериментальные методы ограничиваются, однако, статическими, т.е. тем или иным способом измеряется статическая (или медленно меняющаяся) деформация при постоянной (или меняющейся по определенному закону) нагрузке. Точность таких методов невелика и не превышает 2 %. Гораздо более точными являются акустические методы, поскольку регистрируемый параметр – частота колебаний – может быть измерена с гораздо более высокой точностью. Однако при этом необходимо выполнить два взаимоисключающих условия: образец должен находиться под действием статической нагрузки и в то же время быть акустически свободным, чтобы сжимающее устройство не демпфировало колебаний. Решить эту задачу удалось одному из авторов настоящей работы [2].

Рассмотрим применение этого метода для исследования ползучести хибинита, добываемого на месторождении Ловчорр (г.Кировск Мурманской обл.), поскольку предварительные исследования показали, что этот пористый поликристаллический материал – хибинит, обладающий, как и следовало ожидать, наибольшим внутренним трением, в то же время является наиболее «ползучим». Линейный от логарифма времени характер изменения модуля Юнга наблюдался не во всем диапазоне значений времени, а лишь в ограниченном.

Впервые серии испытаний на ползучесть были проведены с породами, подверженными постоянно действующему напряжению сжатия в течение долгого времени [3, 4]. Было установлено, что упругая деформация u может быть представлена в пределах точности измерений следующим уравнением:

$$u = A \pm B \ln t + Ct, \qquad (1)$$

где t – время; A, B и C – константы, определяемые экспериментально.

Знаки «плюс» (+) и «минус» (–) соответствуют двум различным типам изменений во времени, наложенным друг на друга: соответственно упругому и псевдовязкому течению. Последнее имеет место при постоянной скорости для постоянных напряжений (см. член Ct в уравнении (1)). Здесь следует отметить логарифмический характер ползучести, что характерно для многорелаксационных систем.

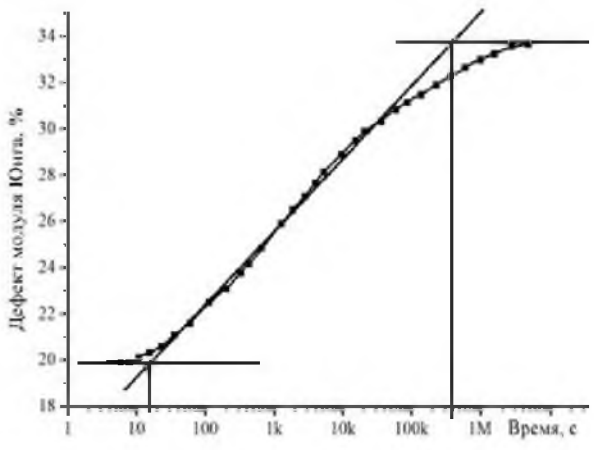
Ранее было показано [2], что после приложения постоянной механической нагрузки внутреннее трение уменьшается, а действующий модуль упругости (модуль Юнга) увеличивается не мгновенно, а в течение некоторого времени, причем переходный процесс после скачкообразного изменения механического напряжения носит неэкспоненциальный характер:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 F(t),$$

где σ – текущее значение напряжения; σ_0 – начальное напряжение; σ_1 – размерный коэффициент; $F(t)$ – единичная функция.

Иначе говоря, релаксационный процесс характеризуется спектром времен релаксации, расположенных достаточно плотно. Под релаксационными процессами здесь можно понимать все возможные процессы, протекающие в поликристаллическом материале с микротрещинами и микропорами.

Результат испытаний под действием приложенного скачкообразно постоянного механического напряжения сжатия 100 МПа показан на рисунке. Закон изменения логарифмический, в полном соответствии с уравнением (1).



Зависимость дефекта модуля Юнга от времени

Изменение во времени Δf любого параметра в материале, обладающем механической вязкостью, описывается с помощью n независимых дифференциальных уравнений релаксационного типа с переменными коэффициентами:

$$\frac{d}{dt}(\Delta f_i) + \varphi_i \Delta f_i = \psi_i \text{ при } i = 1, 2, 3, ..., n,$$

$$\Delta f = \sum_{i=1}^{n} \Delta f_i,$$

где φ_i и ψ_i – соответственно функции механического напряжения и амплитуды скачка напряжения; $n \to \infty$.

Если напряжение изменяется во времени по закону $\sigma(t) = \sigma_0 + \delta\sigma(t)$ и $\delta\sigma(t)$ невелико, то Δf_i изменяется на небольшие величины δf_i вблизи $\Delta f_i^0 = \Delta f_i(\sigma_0) = \text{const}$:

$$\Delta f_i = \Delta f_i^0 + \Delta f_i.$$

Разложение φ_i и ψ_i в ряды Тейлора по степеням $\delta\sigma$ с ограничением в силу малости $\delta\sigma$ только линейными членами дает

$$\tau_i \frac{dx_i}{dt} + x_i = \lambda_i \delta\sigma; \qquad (2)$$

$$x = \sum_{i=1}^{n} x_i, \qquad (3)$$

где через x_i обозначено δf_i, а через x – величина δf.

Тогда

$$\lambda_i = \frac{1}{\varphi_i}\left(\frac{d\psi_i}{d\sigma} - \Delta f_i^0 \frac{d\varphi_i}{d\sigma}\right)\Bigg|_{\sigma=\sigma_0}; \quad \tau_i = \frac{1}{\varphi_i}\Bigg|_{\sigma=\sigma_0}.$$

В случае скачкообразного изменения напряжения $\delta\sigma = \sigma_1 F(t)$ уравнения (2) и (3) имеют решения:

$$1 - \frac{x}{x_c} = \sum_{i=1}^{n} g_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right); \sum_{i=1}^{n} g_i = 1, \qquad (4)$$

где $x_c = \lim_{i\to\infty} x_i g_i = \dfrac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}$.

Здесь g_i имеет смысл веса i-го процесса или вероятности найти процесс со временем релаксации τ_i. Если число релаксационных процессов достаточно велико ($n \to \infty$), то g_i становится бесконечно малой величиной, а выражение (4) принимает вид

$$1 - \frac{x}{x_c} = \int_0^\infty g(\tau) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) d\tau; \int_0^\infty g(\tau) d\tau = 1, \qquad (5)$$

где функция $g(\tau)$ имеет смысл плотности вероятности.

Процессы, приводящие к изменению модуля упругости или внутреннего трения образца, можно грубо разделить на безынерционные (практически мгновенные, т.е. в принятой терминологии – характеризующиеся малой энергией активации) и инерционные (вязкие). Понятие безынерционности, конечно, условно. Речь идет о процессах, достаточно быстрых по сравнению с вязкими. Обозначив относительный вес первых безразмерным параметром ξ ($\xi \le 1$), из (5) получим

$$\eta(t) = 1 - \frac{x}{x_c} = (1 - \xi)\int_0^\infty g(\tau) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) d\tau, \qquad (6)$$

где τ – время релаксации.

С ростом напряжения σ_0 растет относительная доля безынерционных процессов. Таким образом, $\xi(\sigma_0)$ есть функция неубывающая. Возникает вопрос о виде функции

распределения $g(\tau)$. Требуется подобрать такую функцию, чтобы решение уравнения (6) хорошо описывало ход экспериментальных зависимостей. Можно показать, что функция распределения должна удовлетворять интегральному уравнению

$$\int_0^\infty g(\tau)\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)d\tau = \frac{1}{1+Ct},$$

решение которого имеет вид

$$g(\tau) = \frac{1}{c\tau^2}\exp\left(-\frac{1}{c\tau}\right).$$

Наиболее вероятное время релаксации, при котором $g(t)$ максимально,

$$\tau_m = \frac{1}{2B},$$

а среднее время релаксации

$$\overline{\tau} = \int_0^\infty \tau g(\tau)d\tau.$$

Экспериментальные зависимости хорошо описываются при помощи функции, линейной от логарифма времени в некоторых пределах. Такая же закономерность наблюдается для вязкого изменения намагниченности ферромагнетиков и неустановившейся ползучести металлов после приложения скачкообразного возмущения.

Для получения нужной зависимости параметра $x(t)$ от времени после скачка возмущающего параметра функция $g(\tau)$ должна быть задана в следующем виде:

$$g(t) = \frac{1}{\tau(\ln\tau_{max} - \ln\tau_{min})} \quad \text{при } \tau_{min} < \tau < \tau_{max};$$
$$g(t) = 0 \quad \text{при } \tau < \tau_{min};\ \tau > \tau_{max}.$$

Тогда можно получить

$$\frac{x}{x_0} = 1 + \frac{1-\xi}{\ln\tau_{max} - \ln\tau_{min}}\left[E_i\left(-\frac{t}{\tau_{max}}\right) - E_i\left(-\frac{t}{\tau_{min}}\right)\right],$$

где E_i – интегральная показательная функция,

$$E_i\left(-\frac{t}{\tau}\right) = -\int_{-\frac{t}{\tau}}^\infty \frac{\exp\left(\frac{t}{\tau}\right)}{t}dt =$$

$$= C + \ln\frac{t}{\tau} + \sum_{k=1}^\infty (-1)^k \frac{\left(\frac{t}{\tau}\right)^k}{k\times k!}; \qquad (7)$$

$C = 0{,}57721\ldots$ – постоянная Эйлера.

Для очень малых значений времени, значительно меньших нижнего предела спектра времен релаксации $t \ll \tau_{min}$, можно, используя выражение (7), найти

$$-\frac{x}{x_0} \approx \frac{1-\xi}{(\ln\tau_{max} - \ln\tau_{min})}\left(\frac{1}{\tau_{min}} - \frac{1}{\tau_{max}}\right)t + \xi,$$

т.е. вязкое изменение (нарастание или убывание) параметра x происходит по линейному закону.

Если интервал (τ_{min}, τ_{max}) достаточно широк, то в некоторой области выполняется неравенство: $\tau_{min} \ll t \ll \tau_{max}$. Если $(t/\tau) \gg 1$, то

$$E_i\left(-\frac{t}{\tau}\right) \approx \frac{\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}{\frac{t}{\tau}}\left(1 - \frac{1}{\frac{t}{\tau}} + \frac{2!}{\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} - \ldots\right) \to 0.$$

Тогда получим логарифмический закон изменения во времени параметра

$$\frac{x}{x_c} \approx 1 + \frac{1-\xi}{\ln\tau_{max} - \ln\tau_{min}}(C - \ln\tau_{max} + \ln t).$$

Наконец, для значений времени, превышающих верхнюю границу спектра времен релаксации ($t \gg \tau_{max}$), если

$$E_i\left(-\frac{t}{\tau_{min}}\right) = 0;$$

$$E_i\left(-\frac{t}{\tau_{max}}\right) \approx -\frac{\exp\left(-\frac{t}{\tau_{max}}\right)}{t}\tau_{max},$$

закон изменения выглядит следующим образом:

$$\frac{x}{x_c} \approx 1 - \frac{\tau_{max}(1-\xi)}{\ln\tau_{max} - \ln\tau_{min}}\frac{\exp\left(-\frac{t}{\tau_{max}}\right)}{t}.$$

Сравнение с экспериментальными результатами, приведенными на рисунке, показывает их хорошее соответствие предлагаемой модели.

Теперь можно определить границы спектра времен релаксации. Это можно сделать, как показано на рисунке. Оказалось, что для данного типа материала при комнатной температуре (около 300 К) $\tau_{min} = 20$ с, $\tau_{max} = 4 \cdot 10^5$ с. Соответствующие значения энергий активации можно получить, измеряя температурные зависимости границ спектра времен релаксации.

Детальный анализ всех возможных механизмов физических процессов, которые могут иметь место в пористых и микротрещиноватых поликристаллических материалах, выходит за рамки настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пуарье Ж.-П.* Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 287 с.

2. *Цаплев В.М.* Нелинейные свойства и ползучесть пьезокерамики. СПб: Изд-во СЗТУ. 2003. 306 с.

3. *Read T.A.* Internal Friction of Rocks // Phys. Review. 1938. Vol.54. P.389-395.

4. *Read T.A.* Internal Friction of Single Metal Crystals // Phys. Review. 1940. Vol.58. N 4. P.371-380.

REFERENCES

1. *Poirier J.-P.* Creep of crystals. High-temperature deformation processes in metals, ceramics and minerals. Moscow: Mir, 1988. 287 p.

2. *Tsaplev V.M.* Nonlinear Properties and Creep in Piezoceramics. Saint Petersburg: Pub. house of the North-West State Technical University. 2003. 306 p.

3. *Read TA.* Internal Friction of Rocks // Phys. Review. 1938. Vol.54. P.389-395.

4. *Read T.A.* Internal Friction of Single Metal Crystals // Phys. Review. 1940. Vol.58. N 4. P.371-380.