Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство научных организаций
Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике
Научный совет РАН по механике деформируемого твердого тела
Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН
Самарский государственный технический университет

Материалы
X Всероссийской конференции
по механике деформируемого твердого тела

(18–22 сентября 2017 г., Самара, Россия)

Том 2

Под редакцией Н. Ф. Морозова,
А. В. Манжирова, В. П. Радченко

Самара
Самарский государственный технический университет
2017

УДК 539.3(082)
ББК 22.251я431+95.4
М341

Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела (18–22 сентября 2017 г., Самара, Россия): в 2-х томах. Т. 2. / под ред. Н. Ф. Морозова, А. В. Манжирова, В. П. Радченко. — Самара: СамГТУ, 2017. — 306 с.

ISBN 978–5–7964–2028–7 (Т. 2)
ISBN 978–5–7964–2026–3

Сборник включает материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела, состоявшейся 18–22 сентября 2017 г. Самарском государственном техническом университете.

УДК 539.3(082)
ББК 22.251я431+95.4

РУКОВОДСТВО КОНФЕРЕНЦИИ

Почетный председатель:
Н. Ф. Морозов, академик РАН, СПбГУ, Санкт-Петербург

Сопредседатели:
Д. Е. Быков, д.т.н., ректор СамГТУ, Самара
А. В. Манжиров, иностранный член НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Москва

Заместители председателя:
Ю. Н. Радаев, д.ф.-м.н., проф., ИПМех РАН, Москва
В. П. Радченко, д.ф.-м.н., проф., СамГТУ, Самара

Ученые секретари:
Е. В. Мурашкин, к.ф.-м.н., ИПМех РАН, Москва
М. Н. Саушкин, к.ф.-м.н., доц., СамГТУ, Самара

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

М. В. Ненашев, д.т.н., первый проректор–проректор по НР, СамГТУ
В. П. Радченко, д.ф.-м.н., проф., СамГТУ, Самара
В. Ф. Павлов, д.т.н., проф., Самарский университет, Самара
А. А. Андреев, к.ф.-м.н., доц., СамГТУ, Самара
М. Н. Саушкин, к.ф.-м.н., доц., СамГТУ, Самара
О. С. Афанасьева, к.т.н., доц., СамГТУ, Самара
Е. Ю. Арланова, к.ф.-м.н., доц., СамГТУ, Самара
И. Н. Саушкин, к.ф.-м.н., доц., СамГТУ, Самара
Е. А. Максимова, асс., СамГТУ, Самара

ISBN 978–5–7964–2028–7 (Т. 2)
ISBN 978–5–7964–2026–3

© Авторы, 2017
© ИПМех РАН (составление), 2017
© СамГТУ (составление), 2017

Содержание

Канду В. В., Шитикова М. В., Россихин Ю. А. Численный анализ вынужденных колебаний нелинейных пластинок в вязкоупругой среде при наличии внутреннего резонанса 1:1:2 10

Катугина В. О. Ползучесть ортотропных материалов 13

Келлер И. Э., Петухов Д. С. Асимптотическое распределение напряжений вблизи вершины углового выреза в нелинейно упрочняющемся теле 16

Кирпичев В. А., Костичев В. Э., Михалкина С. А., Нагиев А. В. Применение динамического моделирования для определения остаточных напряжений после алмазного выглаживания 19

Кирпичев В. А., Сазанов В. П., Сургутанов Н. А., Шадрин В. К. О связи коэффициента интенсивности напряжений и критической глубины нераспространяющейся трещины усталости 23

Клебанов Я. М., Симаков А. И., Поляков К. А. Применение метода модального разложения для управления квазистатическими деформациями 27

Клюшников В. А., Гончар А. В., Мишакин В. В. Исследование ультразвуковым методом процесса пластического деформирования сварного соединения из аустенитной стали 31

Ковалев А. В., Русина Е. Ю., Яковлев А. Ю. Об исследовании напряженно деформированного состояния в тонкой пластине с упругим включение в виде шайбы 35

Колесникова А. С., Мазепа М. М., Кириллова И. В., Коссович Л. Ю. Моделирование деформации колонного графена: размерный эффект 39

Комарцов Н. М., Кулагина М. А., Рычков Б. А., О трактовке модуля упругости горных пород 42

Коровайцева Е. А. Исследование влияния вязкоупругих характеристик на напряженно-деформированное состояние полуплоскости . . 46

Косыгин А. Н., Косыгина Л. Н. Теоретико-экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния у вершины трещины. Асимптотическое разложение М. Уильямса. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений (метод фотоупругости) 49

Кубышкина С. Н. Расчет напряженно-деформированного состояния резьбового соединения в условиях неупругого реологического деформирования 53

Ларичкин А. Ю., Банщикова И. А. Учет свойств разносопротивляемости растяжению и сжатию в условиях ползучести при кручении круглых стержней 57

УДК 539.32

О трактовке модуля упругости горных пород

Н. М. Комарцов, М. А. Кулагина, Б. А. Рычков

Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б. Н. Ельцина,
Россия, 720000, Бишкек, ул. Киевская, 44.

Аннотация

Рассмотрены известные результаты испытания цилиндрических образцов диорита по схеме Т. Кармана. Для определения упругих констант материала использованы сведения о приращении осевой деформации, когда после гидростатического сжатия задавалось приращение осевого напряжения при достигнутом постоянном боковом давлении.

Ключевые слова: горные породы, деформация, упругость, закон Гука, сложное нагружение.

Введение. Одним из наиболее распространенных видов испытаний образцов горных пород является испытание по схеме Т. Кармана, когда вначале создается гидростатическое давление цилиндрического образца, а затем при постоянном боковом давлении увеличивается осевое давление. В этом случае сложного нагружения (по двузвенной ломанной в пространстве напряжений) обычно фиксируется только приращение осевой деформации, вызванное приращением осевой нагрузки (соответствующей второму звену траектории нагружения). Это обстоятельство приводит к затруднению при определении упругих свойств материала, характеризуемых обобщенным законом Гука. В данном сообщении основное внимание уделяется трактовке модуля упругости как действительной константы материала.

1. Применение закона Гука при сложном нагружении. При рассмотрении охарактеризованной выше двузвенной траектории нагружения считается [1, 2], что отношение приращения осевого напряжения к приращению осевой деформации в пределах ее упругого состояния доставляет модуль Юнга. Однако, как продемонстрировано в эксперименте К. Моги [1], величина определяемого таким образом модуля упругости зависит от вида и уровня напряженного состояния, т.е. не является константой материала. Такая трактовка модуля упругости при указанном сложном нагружении является ошибочной, что доказывается следующим образом.

Образец для цитирования

Комарцов Н. М., Кулагина М. А., Рычков Б. А., О трактовке модуля упругости горных пород / *Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела* (18–22 сентября 2017 г., Самара, Россия). Т. 2. Самара: СамГТУ, 2017. С. 42 45.

Сведения об авторах

Никита Михайлович Комарцов; кандидат физико-математических наук; доцент; e-mail: komartsovnm@mail.ru

Маргарита Алексеевна Кулагина; аспирант; e-mail: kulagina_m.a@mail.ru

Борис Александрович Рычков http://orcid.org/0000-0001-7408-1657
доктор физико-математических наук; профессор; e-mail: rychkovba@mail.ru

Если при разных начальных гидростатических давлениях при последующей догрузке осевым давлением выделить один и тот же вид напряженного состояния, то можно убедиться, что соответствующее приращение осевой деформации и осевого напряжения соответствуют (в пределах разброса экспериментальных данных) линейной зависимости между этими приращениями напряжения и деформации. Сказанное отображается (для начально изотропного материала) обобщенным законом Гука для этих приращений в виде:

$$\Delta\varepsilon_1 = \frac{\Delta\sigma_1}{E}[1 - 2c\nu]. \tag{1}$$

Здесь σ_1 — осевое напряжение, $\sigma_2 = \sigma_3$ — напряжение от бокового давления, $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, вид напряженного состояния характеризуется параметром $c = \sigma_2/\sigma_1$, E — действительный модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона.

Зависимость $\Delta\varepsilon_1(\Delta\sigma_1)$ в работах [1,2] представлена в виде

$$\Delta\varepsilon_1 = \varepsilon_1 - \varepsilon_1^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_1^*}{E_f}, \tag{2}$$

где ε_1^* и σ_1^* значения деформации и напряжения при начальном гидростатическом давлении (т.е. в точке излома рассматриваемой траектории нагружения), а E_f считается модулем упругости.

В экспериментах [1] обнаружено, что значение E_f зависит от вида и уровня напряженного состояния. На самом деле величина E_f является некоторым приведенным модулем. Из сравнения (1) и (2) вытекает, что

$$E_f = \frac{E}{1 - 2c\nu}. \tag{3}$$

2. Сопоставление расчетного и экспериментального значений модуля E_f. Для определения действительного модуля Юнга и коэффициента Пуассона достаточно применить следующую процедуру построения зависимости $\Delta\varepsilon_1(\Delta\sigma_1)$. По экспериментальным данным для каждой осуществленной траектории сложного нагружения можно выделить значения $\Delta\sigma_1$ при двух видах напряженного состояния (т.е. при 2-х значениях параметра c) и соответствующие приращения $\Delta\varepsilon_1$. В результате, согласно (1), получим систему двух линейных алгебраических уравнений относительно E и ν.

Так, например, для диорита [1], указанная выше процедура представлена на рис. 1; получены следующие значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона: $E = 37245$ МПа и $\nu = 0.264$. По этим константам и известному виду напряженного состояния для второго звена траектории нагружения вычислялись расчетные значения приведенного модуля E_f по формуле (3), а экспериментальные значения E_f определялись согласно зависимости (2) при нескольких фиксированных значениях приращения деформации $\Delta\varepsilon_1$ (рис. 2).

Заключение. Таким образом, как при пропорциональном нагружении [3], так и при сложном нагружении упругая деформация горных пород (начально изотропных в исходном состоянии) характеризуется модулем Юнга и коэффициентом Пуассона как действительными константами материала. Как показало настоящее исследование, эмпирическая величина функции $E_f(c)$ отличается от расчетных ее значений не более чем на 10 %.

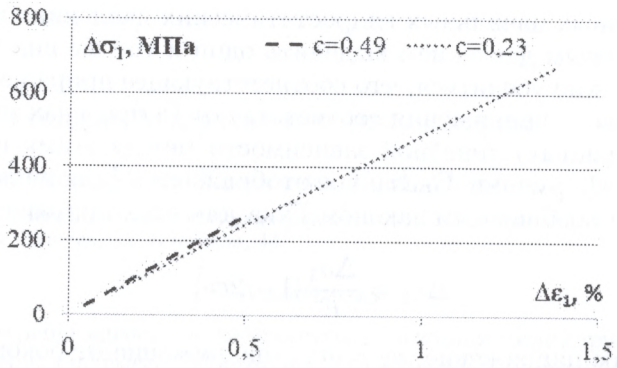

Рис. 1. Зависимость $\Delta\varepsilon_1(\Delta\sigma_1)$ для диорита при двух фиксированных значениях величин c

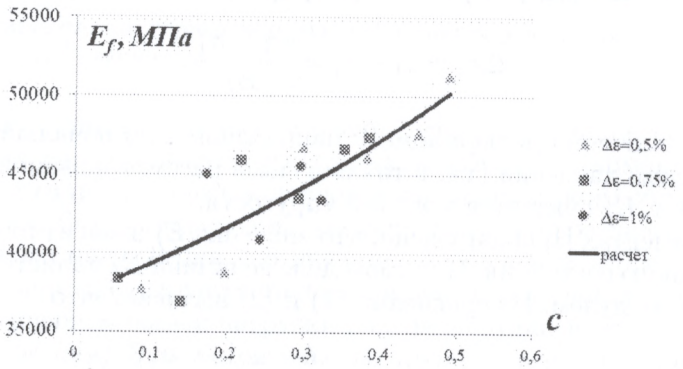

Рис. 2. Расчетные (сплошная линия) и экспериментальные (точки) значения приведенного модуля упругости E_f для диорита

Библиографический список

1. Mogi K. *Experimental rock mechanics.* The Netherlands: Taylor & Francis/Balkema, 2007. 308 pp.
2. Стефанов Ю. П. Нелинейные эффекты поведения горных пород // *Физическая мезомеханика*, 2016. Т. 19, №6. С. 54–61.
3. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. *Пластичность горных пород.* М.: Недра, 1979. 305 с.

On the interpretation of rocks elasticity modulus

N. M. Komartsov, M. A. Kulagina, B. A. Rychkov

Kyrgyz Russian Slavic University,
44, Kievskaya street, Bishkek, 720000, Russian Federation.

Abstract

Experimental data of the testing of cylindrical samples of diorite and peridotite according to T. Karman's scheme are considered. There was used the data on the increment of axial strain, when an increment of the axial stress was set at a constant lateral pressureafter hydrostatic compression.

Keywords: rocks, elasticity, deformation, Hooke law, complex loading.

Please cite this article in press as:
Komartsov N. M., Kulagina M. A., Rychkov B. A. On the interpretation of rocks elasticity modulus, In: *Proceedings of the Tenth Russian Conference on Solid Mechanics* (September, 18–22, 2017, Samara, Russian Federation), Vol. 2, Samara State Technical Univ., Samara, 2017, pp. 42–45 (In Russian).

Authors' Details:

Nikita M. Komartsov; Cand. Phys. & Math. Sci.; e-mail: komartsovnm@mail.ru

Margarita A. Kulagina; Postgraduate Student; e-mail: kulagina_m.a@mail.ru

Boris A. Rychkov http://orcid.org/0000-0001-7408-1657
Dr. Phys. & Math. Sci., Professor; e-mail: rychkovba@mail.ru