

УДК 539.3/.6

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ СКОЛЬЖЕНИЯ В ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ

Т.А. Лужанская

Рассматривается развитие концепции скольжения применительно к пластичным (на основе ортогонального эффекта Баушингера) и полухрупким (описание механических характеристик) материалам.

Ключевые слова: теория пластичности; концепция скольжения; трубчатые образцы; эффект Баушингера; горные породы; механические характеристики.

DEVELOPMENT OF THE SLIDING CONCEPTION IN THE PLASTICITY THEORY

T.A. Luzhanskaya

It is considered the development of the sliding conception in the context of plasticity (based on an orthogonal Baushinger's effect) and semi-brittle (a mechanical characteristic description) materials.

Keys words: plasticity theory; sliding conception; tube specimens; Baushinger's effect; rocks; mechanical characteristics.

Математическая теория пластичности, основанная на концепции скольжения, впервые была предложена в конце 40-х – начале 50-х годов прошлого столетия американскими учеными С.Б. Батдорфом и Б. Будянским. Вскоре сами авторы этой теории, на основании проведенных экспериментов, обнаружили существенные недостатки в предложенной ими модели отображения физического механизма пластической деформации. Критические замечания были высказаны также Иосимурой и И.Д. Рогозиным.

Реабилитация концепции скольжения стала возможной, когда в 60-х годах прошлого столетия М.Я. Леоновым и Н.Ю. Швайко [1] была сформулирована модель плоскопластической деформации. В этой модели основной прочностной характеристикой материала стало сопротивление сдвигу, которое представляет собой локальный предел текучести в заданной плоскости и в определенном направлении происходящего скольжения. Разработкой подобной модели для плосконапряженного состояния занимался (под руководством М.Я. Леонова) К.Н. Русинко [2]. В 1972 г. он защитил докторскую диссертацию, в которой продемонстрировал каким образом можно устранить недостатки модели Батдорфа–Будянского применительно к пластичным материалам.

Разработкой концепции скольжения занимались также А.К. Малмейстер, А.Н. Мохель, С.А. Христианович, Е.И. Шемякин, Б.А. Рычков, Я.И. Рудаев, А.Б. Салиев и др.

М.Я. Леоновым и Б.А. Рычковым [3] было показано, что аналоги всех известных моделей скольжения можно получить, варьируя аналитическое представление сопротивления сдвигу. Доопределение модели Батдорфа–Будянского на предмет отображения эффекта Баушингера, предложенное Комо Марио, также получается как весьма частный случай из некоторого представления сопротивления сдвигу.

Синтез концепции скольжения и явления разрыхления материала позволил смоделировать деформационные и прочностные свойства так называемых полухрупких материалов, таких как чугуны и горные породы.

В статье кратко представлен результат дальнейшего развития концепции скольжения применительно к пластичным материалам (а именно, проведено экспериментальное доказательство приведенного в [4] положения отображения прямого эффекта Баушингера, с позиции концепции скольжения), а также приложение к таким полухрупким материалам как горные породы (аналитическое отображение механических характеристик).

Одной из основных задач теории пластичности является описание напряженно-деформированного состояния твердых тел за пределами упругости при произвольном сочетании внешних нагрузок.

Поскольку при пластическом деформировании материал приобретает деформационную анизотропию, ее моделирование является важной задачей теории пластичности. При решении этой за-

дачи большое значение имеет экспериментальное изучение законов пластического деформирования.

Было проведено экспериментальное исследование деформирования тонкостенных трубчатых образцов с целью выявления ортогонального эффекта Баушингера. Исследование деформационной анизотропии проводилось над тонкостенными трубчатыми образцами из стали марки 40Х на установке 04-1, которая предназначена для проведения опытов на сложное нагружение кручением с растяжением тонкостенных трубчатых образцов. При этом образцы закручивались за пределы упругости, разгружались, затем растягивались с промежуточными разгрузками.

При таком нагружении наблюдался ортогональный эффект Баушингера [5], а на последнем этапе нагружения разность приращений деформаций в растягивающем и сжимающем направлении приводила к уменьшению накопленной при кручении деформации сдвига, т. е. происходила пластическая раскрутка образца.

Также с позиции концепции скольжения были описаны деформационные и прочностные свойства горных пород при неравномерном трехосном сжатии. За критерий прочности при рассмотрении механических характеристик горных пород принимается условие:

$$\tau_{1/2} = S_0 - \mu \sigma_v, \quad (1)$$

где правая часть выражения представляет собой сопротивление скольжению (сдвигу).

На основе условия прочности в виде (1) предложены аналитические зависимости для пределов упругости и прочности горных пород при различных напряженных состояниях неравномерного трехосного сжатия [6].

Сопротивление сдвигу, как основную прочностную характеристику, предлагается использовать для описания чисто пластической составляющей деформации за пределом упругости [7].

Деформация за пределом упругости разделяется на три составляющие: упругую, чисто пластическую (не вызывающую изменение объема) и деформацию разрыхления, для которой установлен коэффициент пропорциональности относительно пластичной деформации. Упругая деформация определяется по закону Гука для ортотропного материала. Пластическая деформация определяется заданием сопротивления сдвигу (S), которое в рамках рассматриваемой теории для практического использования представляется в упрощенном виде:

$$S = \tau_r [1 + \psi \Gamma_{13}^0] = \tau_{\max},$$

где ψ – определяющая функция, которая находится при аппроксимации расчетными зависимостями экспериментальных диаграмм; Γ_{13}^0 – компонента плоскопластической деформации от скольжений (называемых основными) по площади максимального касательного напряжения; τ_r – максимальное касательное напряжение на пределе упругости; τ_{\max} – максимальное касательное напряжение.

Рассмотрение деформационного упрочнения материала с позиции концепции скольжения, принимая при этом за основную прочностную характеристику сопротивление сдвигу, позволяет смоделировать поведение горных пород на пределе упругости и составить их паспорт прочности, используя исходные данные только на одноосное сжатие.

Литература

1. *Леонов М.Я.* Сложная плоская деформация / М.Я. Леонов, Н.Ю. Швайко // Докл. АН СССР. 1964. Т. 159. № 5. С. 1007–1010.
2. *Русинко К.Н.* Теория пластичности и неустановившейся ползучести / К.Н. Русинко. Львов: Виц. шк., 1981. 148 с.
3. *Леонов М.Я.* Устойчивость и прочность элементов конструкций / М.Я. Леонов, Б.А. Рычков // Основы механики пластических материалов. Фрунзе: Илим, 1987. Гл. 8.
4. *Комарцов Н.М.* Анизотропия от скольжений при сложной деформации пластичных материалов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Н.М. Комарцов. Бишкек, 2009. 18 с.
5. *Волков А.В.* Ортогональный эффект Баушингера / А.В. Волков, Т.А. Лужанская, Б.А. Рычков // Тез. докл. ежегодной конф. молодых ученых и студентов “Современные техника и технологии в научных исследованиях”. Бишкек, 2011. С. 29–31.
6. *Жигалкин В.М.* О теоретическом и экспериментальном построении огибающей предельных кругов Мора / В.М. Жигалкин, Т.А. Лужанская, Б.А. Рычков, О.М. Усольцева, П.А. Цой // ФТПРПИ. 2010. Т. 46. № 6. С. 25–36.
7. *Рычков Б.А.* О деформации и разрушении горных пород / Б.А. Рычков, Т.А. Лужанская // Матер. 2-й межд. конф. “Актуальные проблемы теории управления, топологии и операторных уравнений”, посв. 20-летию образцов. КРСУ и 100-летию проф. Я.В. Быкова. Бишкек, 2013. Т. 2. С. 163–166.