

УДК 539.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
САМОНАПРЯЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

**С. В. Лавриков, А. Ф. Ревуженко**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: lvk64@mail.ru, revuzhenko@yandex.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Используется математическая модель структурно-неоднородной горной породы, описывающая ее свойство запасать и высвобождать упругую потенциальную энергию. Разработан конечно-элементный алгоритм и программный комплекс по решению плоских краевых задач геомеханики. Проведены расчеты деформирования самонапряженных образцов горных пород. Показано, что диаграмма деформирования образцов зависит не только от упругопластических свойств среды, но и от собственных самоуравновешенных напряжений. В зависимости от знака эти напряжения могут как увеличивать, так и снижать предельную нагрузку, при которой происходит разрушение образцов.

*Горная порода, внутренняя структура, собственные самоуравновешенные напряжения, моделирование*

В настоящее время актуальными становятся вопросы обеспечения безопасности сложных технологических объектов, таких как шахты и рудники, промышленные сооружения, подземные хранилища. Опасные проявления горного давления (горные удары, землетрясения) могут быть вызваны как естественной сейсмической активностью, так и техногенной деятельностью, которые могут сыграть роль триггера и привести к высвобождению запасенной в массиве упругой энергии.

Свойство породного массива аккумулировать энергию внешних воздействий является одним из фундаментальных. Оно связано с тем, что реальный массив представляет собой иерархическую блочную структуру, обладающую множественностью форм равновесного состояния [1–3]. При этом отдельные области массива накапливают энергию в виде внутренних самоуравновешенных напряжений [4, 5], т. е. выступают в роли потенциальных источников энергии. При определенных условиях эта энергия может высвободиться, причем процесс может носить как устойчивый релаксационный, так и неустойчивый катастрофический характер. В [6–14] приведены экспериментальные факты и натурные наблюдения, показывающие, что самоуравновешенные напряжения играют важную роль в процессах деформирования и разрушения горных пород.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10121).

Классическая постановка задачи геомеханики заключается в том, чтобы по заданным на границе напряжениям или смещениям, а также массовым силам найти напряжения и деформации внутри определенной области горного массива. Однако в случае самонапряженного массива решение задачи требует дополнительных данных, поскольку краевые условия не несут информации о собственных самоуравновешенных напряжениях. В этом случае необходимо знать не только массовые силы и граничные условия, но и условия формирования массива. Иными словами, необходимо знать, каким образом собственные самоуравновешенные напряжения распределены в массиве.

Учет иерархического строения массива возможен в рамках различных подходов. В [15, 16] развивается математический аппарат и модели, содержащие внутренние переменные, с помощью которых описываются свойства среды в элементах внутренней структуры на различных масштабных уровнях.

Последовательное развитие моделей с внутренними переменными приводит к необходимости наделять внутренней структурой саму независимую переменную. Это можно сделать путем введения неархимедовой прямой. Развитию методов неархимедова анализа посвящены работы [17, 18]. На этой основе построена математическая модель структурно-неоднородного массива горных пород [19].

В настоящей работе воспользуемся построениями [20–22] и рассмотрим один из возможных вариантов математической модели для численного анализа процессов деформирования образцов горных пород, заряженных энергией собственных самоуравновешенных напряжений.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим двухмасштабную модель самонапряженного массива [20–22] (деформация плоская). На микромасштабном уровне упругие частицы (зерна) находятся в узлах квадратной решетки. Между частицами возможны пластические сдвиги, развивающиеся по нелинейному закону с учетом стадий упрочнения, разупрочнения и остаточной прочности. Диаграмма межзеренного микропроскальзывания, связывающая касательные усилия  $t_{12}$  со сдвигами  $\varepsilon_{ij}^R$ , показана на рис. 1 (кусочно-линейная аппроксимация). В эффективной регулярной упаковке зерен существуют два ортогональных семейства межзеренных контактов. При этом допускаются независимые проскальзывания по каждому из семейств, т. е. предполагается, что  $\varepsilon_{12}^R \neq \varepsilon_{21}^R$  [16]. Поровая среда является также упругой, но с отличными от частиц упругими свойствами. Усилия, возникающие в поровой среде, могут компенсироваться усилиями на контактах между частицами, поэтому при отсутствии внешних напряжений внутренние самоуравновешенные напряжения будут значительными.

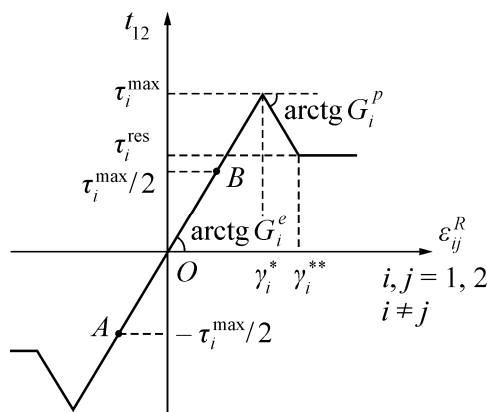


Рис. 1. Диаграмма межзеренного проскальзывания

Условия контактного проскальзывания между зернами аппроксимированы кусочно-линейной диаграммой (см. рис. 1) и для приращений напряжений и деформаций имеют следующий вид:

$$\Delta \varepsilon_{12}^R = \frac{\Delta t_{12}}{G_1^s}, \quad \Delta \varepsilon_{21}^R = \frac{\Delta t_{12}}{G_2^s}, \quad (1)$$

где  $G_1^s, G_2^s$  — заданные модули контактного проскальзывания вдоль каждого из семейств контактов. Модули  $G_1^s, G_2^s$  однозначно определяются константами  $\gamma_i^*, \gamma_i^{**}, \tau_i^{\max}, \tau_i^{\text{res}}$ , где  $i = 1, 2$  — номер семейства контактов:

$$G_i^s = \begin{cases} G_i^e, & 0 \leq \gamma_i < \gamma_i^*; \\ -G_i^p, & \gamma_i^* \leq \gamma_i < \gamma_i^{**}; \\ 0, & \gamma_i^{**} \leq \gamma_i. \end{cases}$$

Определяющие соотношения модели [20–22] на макромасштабном уровне представляют собой связь приращений макронапряжений  $\Delta \sigma_{ij}$  с приращениями макродеформаций  $\Delta \varepsilon_{ij}$ :

$$\begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_{11} \\ \Delta \varepsilon_{22} \\ \Delta \varepsilon_{12} \end{pmatrix} = W((T + R)^{-1} + 2(T + P)^{-1})W^{-1} \begin{pmatrix} \Delta \sigma_{11} \\ \Delta \sigma_{22} \\ \Delta \sigma_{12} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Коэффициенты определяющих уравнений (2) зависят от микросвойств зерен (матрица  $T$ ), порового материала (матрица  $P$ ), модулей контактного проскальзывания между зернами (матрица  $R$ ), а также от угла  $\alpha$ , отвечающего за ориентацию регулярной упаковки зерен относительно осей декартовой системы координат (матрица  $W$ ).

Условия совместности микро- и макропараметров позволяют сформулировать связь макро-напряжений  $\sigma_{ij}^*$  (символ “\*” означает проекции на оси, совпадающие с осями регулярной упаковки зерен) и микронапряжений в зернах  $t_{ij}$  и в поровой среде  $p_{ij}$ :

$$\sigma_{ij}^* = t_{ij} + 2mp_{ij}, \quad i, j = 1, 2, \quad (3)$$

где безразмерная величина  $0 < m < 1$  имеет смысл параметра просветности [16].

Рассмотрим подробнее условия (3). Пусть в объеме среды зафиксировано некоторое напряженное состояние зерен и порового материала, т. е. заданы величины  $t_{ij}, p_{ij}$ . В этом случае макро-напряжения  $\sigma_{ij}^*$  находятся однозначно. В свою очередь, обратная задача (по макро-напряженному состоянию  $\sigma_{ij}^*$  определить микронапряжения зерен  $t_{ij}$  и порового материала  $p_{ij}$ ) допускает множество решений. Одни и те же макронапряжения элементарного объема среды, с одной стороны, могут означать, что они воспринимаются зернами, а поровый материал нагрузки не испытывает, с другой стороны, напряжения могут быть сосредоточены в поровой среде, а контакты между зернами не имеют нагрузки. В промежуточных состояниях общая макронагрузка распределяется между зернами и поровой средой в различных пропорциях. Отсутствие макро-напряжений не означает, что внутренние микронапряжения среды также отсутствуют. Возможна ситуация, когда в зернах и поровом материале действуют различные по знаку и компенсирующие друг друга микронапряжения, например  $t_{ij} = 2mA_{ij}^0$  и  $p_{ij} = -A_{ij}^0$ , при этом суммарные макро-напряжения оказываются равными нулю:  $\sigma_{ij}^* = t_{ij} + 2mp_{ij} = 0$ . Таким образом, данный подход позволяет описать внутренние самоуравновешенные напряжения среды.

Система определяющих соотношений (2) замыкается уравнениями равновесия в отсутствии массовых сил (для приращений):

$$\frac{\partial \Delta \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \Delta \sigma_{12}}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial \Delta \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \Delta \sigma_{22}}{\partial x_2} = 0. \quad (4)$$

Система уравнений (2), (4) при заданных граничных условиях позволяет рассчитать один шаг по приращениям напряжений и деформаций. Общее решение задачи осуществляется в виде итерационного процесса  $\sigma_{ij}^{k+1} = \sigma_{ij}^k + \Delta \sigma_{ij}^k$ ,  $\varepsilon_{ij}^{k+1} = \varepsilon_{ij}^k + \Delta \varepsilon_{ij}^k$ , где  $k$  — номер итерации. Это означает, что наряду с краевыми условиями необходимо еще установить начальное напряженное состояние среды  $\sigma_{ij}^0$  (значения нулевой итерации). Однако задания начальных макронапряжений  $\sigma_{ij}^0$  для решения поставленной задачи недостаточно. Необходимо определить каждую из составляющих этих напряжений, т. е. начальные микронапряжения  $t_{ij}^0$ ,  $p_{ij}^0$ .

На основе описанного подхода и математической модели структурно-неоднородного породного массива (2), (4) разработаны конечно-элементный алгоритм и программный комплекс по решению плоских краевых задач с учетом собственных самоуравновешенных напряжений.

#### АНАЛИЗ МОДЕЛИ

Известно, что численное решение задач механики деформируемого твердого тела с учетом разупрочнения (ниспадающая ветвь) наталкивается на ряд математических трудностей. Так, при учете разупрочнения возникают вопросы о единственности решения. Наличие упругих элементов в среде и учет разупрочнения могут приводить к неустойчивому деформированию. Последнее означает, что в среде происходит динамическое неконтролируемое краевыми условиями высвобождение накопленной упругой энергии.

Рассмотрим сформулированную выше математическую модель массива горных пород (2), (4), проанализируем тип этой системы. В общем случае выражение для существования характеристик является весьма громоздким. Для выяснения сути достаточно исследовать частный случай, когда упругие модули Юнга и коэффициенты Пуассона для зерен  $E^t, \nu^t$  и для поровой среды  $E^p, \nu^p$  совпадают между собой (обозначим их соответственно  $E, \nu$ ), а также совпадают условия проскальзываний вдоль двух различных семейств межзеренных контактов  $G_1^s = G_2^s$  (обозначим  $G^s$ ). Тип системы уравнений (2), (4) характеризуется значением одного параметра — наклоном ниспадающей ветви диаграммы межзеренных проскальзываний  $G^p$ . Оказалось, что тип системы будет гиперболическим, если значение  $G^p$  лежит в диапазоне

$$\mu < G^p < \frac{\mu(3+\nu)}{2}, \quad (5)$$

где  $\mu = E/(2(1+\nu))$  — упругий модуль сдвига. При других значениях параметра  $G^p$  тип системы эллиптический.

Проведенный анализ позволяет сделать следующее заключение. На стадии контактного упрочнения между зернами (восходящий участок диаграммы на рис. 1) система имеет эллиптический тип. При учете разупрочнения на межзеренных контактах возможны три различные ситуации в зависимости от наклона ниспадающей ветви. В первом случае при слабом разупрочнении, когда модуль  $G^p$  не превышает  $G^p < \mu$  (для рассмотренного частного случая), тип системы остается эллиптическим. Здесь упругое упрочнение зерен и поровой среды превалирует над разупрочнением на межзеренных контактах и, таким образом, макродиаграмма деформирования среды представляет собой упругопластическую диаграмму с упрочнением.

Второй случай реализуется в диапазоне параметров разупрочнения, заданных условием (5). Тип системы меняется на гиперболический. Теперь уже разупрочнение на контактах превалирует над упругим упрочнением зерен и поровой среды, а макродиаграмма содержит ниспадающую ветвь.

Последний случай реализуется, когда наклон ниспадающей ветви на контактах достаточно крутой:  $G^p > \mu(3 + \nu)/2$ . Тип системы снова меняется на эллиптический. При этом макродиаграмма представляет собой диаграмму с упрочнением, однако деформирование по ней осуществляется в направлении разгрузки. При таком деформировании на разупрочняющихся межзеренных контактах происходят динамические скачки с высвобождением накопленной упругой энергии, приводящие к упругой разгрузке зерен и поровой среды.

В дальнейшем при численных расчетах на основе определяющих соотношений (2) ограничимся только первым и последним случаями, т. е. значение параметров разупрочнения будем выбирать таким образом, чтобы исключить диапазон (5), т. е. разупрочнение макродиаграммы и гиперболичность системы уравнений. Процесс деформирования в первом случае является устойчивым, а в последнем — неустойчивым, сопровождающимся динамическим высвобождением накопленной упругой энергии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим примеры расчета сжатия образца геоматериала с учетом собственных самоуравновешенных напряжений. Пусть прямоугольный образец с линейными размерами  $h, d$  сжимается под действием равномерно распределенного нормального напряжения  $\Phi$  на границе  $\Gamma_2$  (рис. 2). Боковые границы образца  $\Gamma_1$  свободны, на торцах  $\Gamma_2$  заданы условия прилипания:

$$\Delta\sigma_{22}|_{\Gamma_2} = -\Delta\Phi, \quad \Delta u_1|_{\Gamma_2} = 0, \quad \Delta\sigma_{11}|_{\Gamma_1} = \Delta\sigma_{12}|_{\Gamma_1} = 0, \quad (6)$$

где  $\Delta\sigma_{ij}, \Delta u_i$  — приращения напряжений и смещений на соответствующем участке границы;  $\Delta\Phi$  — приращение параметра нагружения.

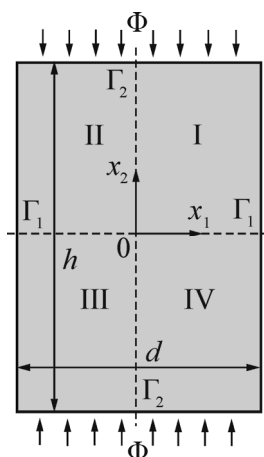


Рис. 2. Постановка задачи

Выберем следующие безразмерные значения параметров расчета (здесь и ниже все размерности напряжений отнесены к максимальному касательному напряжению на пике диаграммы  $\tau_1^{\max}$ , см. рис.1):

$$\begin{aligned}
 E^t &= 2.4 \cdot 10^3; \quad \nu^t = 0.2; \quad E^p = 1.04 \cdot 10^3; \quad \nu^p = 0.3; \\
 \gamma_1^* &= \gamma_2^* = 10^{-3}; \quad \gamma_1^{**} = \gamma_2^{**} = 5 \cdot 10^{-3}; \\
 \tau_1^{\max} &= \tau_2^{\max} = 1; \quad \tau_1^{\text{res}} = \tau_2^{\text{res}} = 0.4; \\
 \frac{h}{d} &= 1.4; \quad m = 0.5; \quad \alpha = 0.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Нетрудно убедиться, что в этом случае задача относится к эллиптическому типу, а деформирование будет осуществляться устойчиво, т. е. без динамических скачков разупрочнения на межзеренных контактах.

Рассмотрим численный эксперимент для трех вариантов задания самоуравновешенных микронапряжений. В качестве первого возьмем вариант, когда в среде собственные самоуравновешенные напряжения отсутствуют, т. е.  $t_{ij}^0 = p_{ij}^0 = 0$ . На диаграмме (см. рис. 1) такое состояние соответствует точке  $O$ . В этом случае все компоненты тензора макронапряжений также будут отсутствовать  $\sigma_{ij}^0 = 0$ . Результаты расчета с указанными параметрами представлены на рис. 3а. Здесь и ниже показаны области, где реализуются различные стадии деформирования на межзеренных контактах: белый цвет — стадия упругого упрочнения (восходящий участок), светло-серый — стадия разупрочнения (ниспадающий участок), темно-серый — стадия остаточной прочности (горизонтальный участок) (см. рис. 1). Видно, что в процессе нагружения зоны пластической деформации развиваются от концентраторов напряжений вглубь образца. После достижения определенной нагрузки в образце вдоль боковых свободных границ формируются дополнительные независимые зоны пластической деформации. Расчет проведен до значения параметра нагружения  $\Phi = 1.7 \cdot 10^3$ .

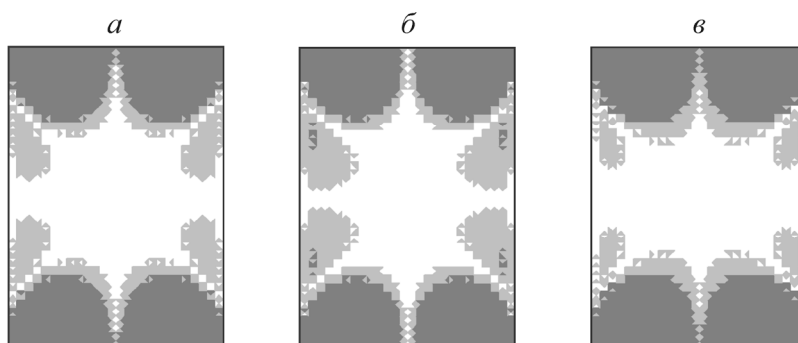


Рис. 3. Развитие зон пластической деформации при  $\Phi = 1.7 \cdot 10^3$ ,  $\alpha = 0$ : а — собственные напряжения отсутствуют; б — собственные напряжения увеличивают податливость образца; в — собственные напряжения уменьшают податливость образца

Зададим теперь ненулевые и компенсирующие друг друга собственные самоуравновешенные напряжения. Учитывая, что деформация в образце при сжатии развивается симметрично относительно осей образца, а сдвиги в I и III четвертях противоположны по знаку сдвигам в II и IV четвертях (рис. 2), зададим касательные микроусилия:

$$t_{12}^0 = 0.5, p_{12}^0 = -0.5 \text{ — в I и III четвертях; } t_{12}^0 = -0.5, p_{12}^0 = 0.5 \text{ — во II и IV четвертях.}$$

На диаграмме (см. рис. 1) указанные начальные состояния соответствуют точке  $A$  в II и IV четвертях и точке  $B$  в I и III четвертях образца. Остальные компоненты тензоров  $t_{ij}^0, p_{ij}^0$  положим равными нулю. Все компоненты макронапряжений также будут равны  $\sigma_{ij}^0 = 0$ . Проведем расчет до того же самого значения параметра нагружения  $\Phi = 1.7 \cdot 10^3$ . Результаты показа-

ны на рис. 3б. Видно, что зоны пластической деформации развиваются по схожему сценарию, но захватывают большие области в образце, чем это было в первом расчете. Степень податливости образца можно характеризовать интегральным секущим модулем сжатия — отношением сжимающего усилия к общей деформации образца. По результатам расчетов можно заключить, что в данном случае заданные самоуравновешенные напряжения приводят к уменьшению секущего модуля, т. е. увеличивают податливость образца. По мере увеличения параметра нагружения разрушение образца произойдет при меньшей предельной нагрузке, чем образца без начальных самоуравновешенных напряжений.

Третий вариант расчета осуществим при задании противоположенных по знаку собственных напряжений:

$$t_{12}^0 = -0.5, p_{12}^0 = 0.5 \text{ — в I и III четвертях; } t_{12}^0 = 0.5, p_{12}^0 = -0.5 \text{ — во II и IV четвертях.}$$

Картина деформирования при достижении того же самого параметра нагружения показана на рис. 3в. Видно, что теперь собственные напряжения уменьшают податливость образца (зоны пластической деформации охватывают меньшую площадь). Несущая способность на сжатие в целом увеличивается, и разрушение произойдет при большей сжимающей нагрузке.

Проведем другой численный эксперимент. Нагружение будем осуществлять так же с параметрами задачи (7) до значения параметра нагружения  $\Phi = 7.95 \cdot 10^2$ . При этом определим два различных варианта собственных самоуравновешенных напряжений:

$$t_{12}^0 = 0, p_{12}^0 = 0 \text{ для расчета а; } t_{12}^0 = -0.5, p_{12}^0 = 0.5 \text{ для расчета б.} \quad (8)$$

Остальные компоненты микронапряжений и, соответственно, все компоненты макронапряжений равны нулю. Результаты расчетов показаны на рис. 4. Видно, что заданные собственные напряжения (в силу несимметричного способа распределения относительно осей симметрии образца) приводят к развитию несимметричных зон пластической деформации даже в случае симметричных условий нагружения (см. рис. 4б).

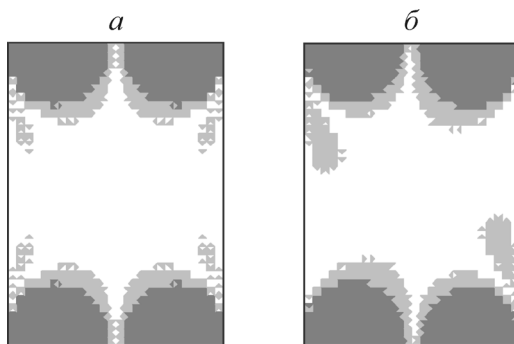


Рис. 4. Развитие зон пластической деформации при значении параметра нагружения  $\Phi = 7.95 \cdot 10^2$ ,  $\alpha = 0$ : а — собственные напряжения отсутствуют; б — собственные напряжения приводят к развитию несимметрии деформирования

Для следующего численного эксперимента выберем все параметры задачи в виде (7), за исключением параметра  $\alpha$ , который положим равным  $\alpha = \pi/4$ . Теперь ориентация зеренной структуры такова, что оба семейства межзеренных контактов отклоняются от оси сжатия образца на одинаковый угол  $\alpha = \pi/4$ . Это означает, что задание собственных напряжений вида (8) не приведет к несимметрии процесса деформирования. Здесь влияние собственных напряжений будет максимальным, поскольку межзеренные контакты в силу своей ориентации испытывают максимальную интенсивность касательных напряжений. Снова проведем три расчета при задании трех вариантов собственных напряжений:

$$\begin{aligned}
 t_{12}^0 = 0, p_{12}^0 = 0 & \text{ для расчета } a; \\
 t_{12}^0 = -0.5, p_{12}^0 = 0.5 & \text{ для расчета } б; \\
 t_{12}^0 = 0.5, p_{12}^0 = -0.5 & \text{ для расчета } в.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Картины деформирования представлены на рис. 5. При этом параметр нагружения в приведенных расчетах неодинаков:  $\Phi = 1.316 \cdot 10^2$  (рис. 5а),  $\Phi = 1.7 \cdot 10^2$  (рис. 5б),  $\Phi = 0.842 \cdot 10^2$  (рис. 5в). В расчетах на рис. 5б и рис. 5в сжимающая нагрузка различается в 2 раза. Тем не менее в случае, когда собственные напряжения уменьшают податливость, т. е. “сопротивляются” нагружению образца (см. рис. 5б), зоны пластической деформации даже при вдвое большей нагрузке только начинают формироваться. В противоположной ситуации, когда собственные напряжения уменьшают податливость (см. рис. 5в), зоны пластической деформации при вдвое меньшей нагрузке охватывают практически весь образец.

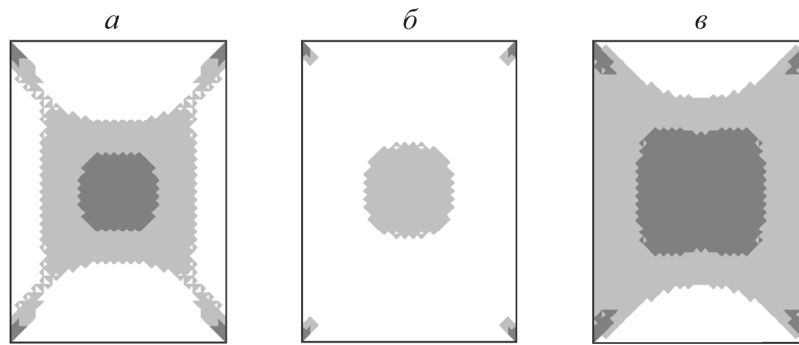


Рис. 5. Развитие зон пластической деформации при  $\alpha = \pi/4$ : а — собственные напряжения отсутствуют ( $\Phi = 1.316 \cdot 10^2$ ); б — собственные напряжения уменьшают податливость ( $\Phi = 1.7 \cdot 10^2$ ); в — собственные напряжения увеличивают податливость ( $\Phi = 0.842 \cdot 10^2$ )

В заключение рассмотрим еще один численный эксперимент. Выберем параметры в виде (7) и изменим в них значения  $\gamma_1^* = \gamma_2^* = 5 \cdot 10^{-2}$ ,  $\gamma_1^{**} = \gamma_2^{**} = 5.01 \cdot 10^{-2}$ ,  $\tau_1^{\text{res}} = \tau_2^{\text{res}} = 0$ ,  $\alpha = \pi/4$ . При этих параметрах тип системы по-прежнему остается эллиптическим, однако наклон ниспадающей ветви диаграммы становится достаточно крутым и деформирование будет неустойчивым. Это означает, что если на каком-либо межзеренном контакте диаграмма деформирования выйдет на ниспадающий участок (см. рис. 1), то в этой точке среды должен произойти локальный динамический скачок разупрочнения. При этом остаточная прочность отсутствует, т. е. локально материал полностью теряет способность сопротивляться сдвигу.

В описанной схеме построения решения не предусмотрена возможность расчета динамических скачков непосредственно. Задача решается в квазистатической постановке. Расчет с указанными параметрами будем осуществлять с применением специального алгоритмического приема [21]. Он заключается в том, что в момент наступления динамического скачка вводится в рассмотрение искусственное внешнее воздействие путем задания отрицательного приращения параметра нагружения. Данное воздействие позволяет “придержать” динамический скачок и реализовать его в виде квазистатического проскальзывания. После реализации проскальзывания искусственное воздействие убирается и вновь задается положительное приращение параметра нагружения. Величина проскальзывания рассчитывается таким образом, чтобы соответствовать динамическому скачку в отсутствии сил инерции. При этом все качественные проявления динамических скачков разупрочнения схема расчета сохраняет и позволяет построить хорошее приближение к решению динамической задачи, оставаясь в рамках квазистатической постановки.



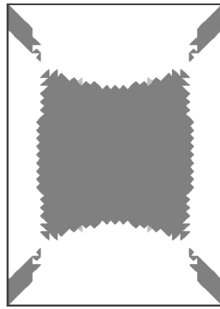


Рис. 6. Развитие зон локального разрушения (потери сдвиговой прочности),  $\alpha = \pi/4$

Собственные самоуравновешенные напряжения зададим в виде (9) и проведем три расчета для ранее рассмотренных случаев  $a$ ,  $b$  и  $v$  соответственно. На рис. 6 показана картина деформирования, которая реализуется во всех трех вариантах расчета при различных параметрах нагружения ( $a$  —  $\Phi = 1.04 \cdot 10^2$ ,  $b$  —  $\Phi = 1.56 \cdot 10^2$ ,  $v$  —  $\Phi = 0.52 \cdot 10^2$ ). Видно, что светло-серые области, соответствующие стадии разупрочнения на межзеренных контактах, отсутствуют. Образуюсь, они скачком превращаются в области потери сдвиговой прочности (темно-серые).

Указанные параметры нагружения для всех трех вариантов расчета являются предельными, поскольку последующее незначительное увеличение параметра нагружения приведет к смыканию темно-серых областей, что будет означать макроскопическую потерю сдвиговой прочности образца, т. е. его разрушение.

Таким образом, в зависимости от способа задания собственные самоуравновешенные напряжения могут либо увеличить, либо снизить несущую способность материала. Задание только касательной составляющей самоуравновешенных напряжений на межзеренных контактах, равных половине от максимальных, приводит к троекратному отличию предельной нагрузки в расчетах  $b$  и  $v$ .

Результаты расчетов позволяют также заключить, что существует такое распределение собственных самоуравновешенных напряжений в образце, которое с самого начала его нагружения может оказаться критическим. В этом случае любое незначительное увеличение нагрузки приведет к скачкообразному разрушению образца.

#### ВЫВОДЫ

Разработанный подход позволяет решать задачи деформирования структурно-неоднородных геоматериалов с учетом собственных самоуравновешенных напряжений.

Диаграмма макродеформирования образца зависит не только от упругопластических свойств материала, но и от распределения внутренних самоуравновешенных напряжений.

Самоуравновешенные напряжения в зависимости от их распределения могут как увеличивать, так и снижать предельную нагрузку, при которой наступает разрушение образца.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И. О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // ФТПРПИ. — 1974. — № 3. — С. 130–133.
2. Садовский М. А. Об естественной кусковатости горных пород // ДАН СССР. — 1979. — Т. 247. — № 4. — С. 829–832.
3. Кочарян Г. Г., Спивак А. А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. — М.: ИЦК Академкнига, 2003. — 422 с.

4. Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН СССР. — 1987. — Т. 293. — № 1. — С. 67–70.
5. Адушкин В. В., Гарнов В. В., Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф. Знакопеременная реакция горной породы на динамическое воздействие // ДАН. — 1992. — Т. 323. — № 2. — С. 263–269.
6. Адушкин В. В., Кочарян Г. Г., Остапчук А. А. О параметрах, определяющих долю энергии, излучаемой при динамической разгрузке участка массива горных пород // ДАН. — 2016. — Т. 467. — № 1. — С. 86–90.
7. Ребецкий Ю. Л. Оценка влияния суточного вращения Земли на напряженное состояние континентальной коры // ДАН. — 2016. — Т. 469. — № 2. — С. 230–234.
8. Выявление самонапряженного состояния горной породы. ОАО “НИЦ Строительство”, Стандарт организации СТО 36554501-019-2009. — М., 2010. — 31 с.
9. Мороз А. И. Самонапряженное состояние горных пород. — М.: МГГУ, 2004. — 288 с.
10. Ставрогин А. Н., Ширкес О. А. Явление последействия в горных породах, вызванное предшествующей необратимой деформацией // ФТПРПИ. — 1986. — № 4. — С. 16–27.
11. Горяинов П. М., Давиденко И. В. Тектоно-кессонный эффект в массивах горных пород и рудных месторождений — важное явление геодинамики // ДАН СССР. — 1979. — Т. 247. — № 5. — С. 1212–1215.
12. Пономарев В. С. Проблемы изучения энергетически активной геологической среды // Геотектоника. — 2011. — № 2. — С. 66–75.
13. Peng Z., Gombert J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena, Nature Geoscience, 2010, No. 3. — P. 599–607.
14. Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. of Geophysical Research, 1970, Vol. 75, Issue 26. — P. 4997–5009.
15. Онами М., Ивасимидзу С., Гэнка К., Сиодзава К., Танака К. Введение в микромеханику / под ред. М. Онами; пер. с япон. Г. Я. Гунна. — М.: Металлургия, 1987. — 280 с.
16. Ревуженко А. Ф. Механика упругопластических сред и нестандартный анализ. — Новосибирск: НГУ, 2000. — 426 с.
17. Ревуженко А. Ф. Математический анализ функций неархимедовой переменной. Специализированный математический аппарат для описания структурных уровней геосреды. — Новосибирск: Наука, 2012. — 327 с.
18. Ревуженко А. Ф. О приложениях неархимедова анализа в механике блочно-иерархической геосреды // ФТПРПИ. — 2016. — № 5. — С. 14–22.
19. Лавриков С. В., Микенина О. А., Ревуженко А. Ф. Моделирование процессов деформирования массива горных пород с использованием методов неархимедова анализа // ФТПРПИ. — 2008. — № 1. — С. 3–16.
20. Лавриков С. В., Микенина О. А., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. Концепция неархимедова многомасштабного пространства и модели пластических сред со структурой // Физ. мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 3. — С. 45–60.
21. Lavrikov S. V., Mikenina O. A., Revuzhenko A. F. A non-archimedean number system to characterize the structurally inhomogeneous rock behavior nearby a tunnel, J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, No. 3 (2). — P. 153–160.
22. Lavrikov S. V., Revuzhenko A. F. Deformation of geo-medium with considering for internal self-balancing stresses, AIP Conference Proceedings, 2016, 1783. 020130-1 – 020130-4. doi: 10.1063/1.4966423.

Поступила в редакцию 1/XII 2016