

irregularity of load distribution by contact line. The different stress values in the weak teeth are defined by periodically changing value of azimuth error. The weak gear pair engages into mesh periodically after defined number of turns. In this connection, time-dependent modes may be reduced to equivalent, when open gearing is calculated. The analysis of equivalent numbers of stress rates shows, that the calculated value of working contact stress and working bending stress for the tooth can be increased by 1.20 and 1.26 times respectively, during the bending and contact endurance analysis.

**Originality.** The regularities of actual contact line deviations and the time dependent behavior of factor of irregularity of load distribution by contact line have been determined.

**Practical value.** We have developed the technique of determination of equivalent stress numbers during the bending and contact endurance analysis.

**Keywords:** *tumbling mill, open gearing, strength*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.П. Франчуком. Дата надходження рукопису 13.12.13.*

УДК 539.3

**И.Е. Шиповский, канд. техн. наук**

Научно-исследовательский центр Вооруженных Сил Украины „Государственный океанариум“, г. Севастополь, АР Крым, e-mail: ivev@i.ua

## РАСЧЕТ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕССЕТОЧНОГО МЕТОДА

**I.Ye. Shipovskii, Cand. Sci. (Tech.)**

State Oceanarium of Ukraine, Sevastopol, Crimea, e-mail: ivev@i.ua

## SIMULATION FOR FRACTURE BY SMOOTH PARTICLE HYDRODYNAMICS CODE

**Цель.** Определение влияния наличия трещин на напряженно-деформированное состояние (НДС) и характер разрушения горной породы, а также оценка возможностей выбранного расчетного подхода к решению задач хрупкого разрушения.

**Методика.** С помощью компьютерного моделирования методом сглаженных частиц SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) исследуется поведение хрупких образцов породы при одноосном сжатии. Определяются основные параметры: распределение напряжений, возникающих при нагружении, а также образование областей разрушения в образцах.

**Результаты.** Получены картины разрушения хрупких образцов горной породы с начальной центральной трещиной различной ориентации при одноосном сжатии. Результаты показывают влияние ориентации трещины на характер разрушения. Использование метода сглаженных частиц позволяет достаточно точно рассчитывать задачи деформирования и разрушения образцов с наличием трещин.

**Научная новизна.** Разработана и реализована вычислительная технология для решения рассматриваемого класса задач. Путем компьютерного моделирования определено влияние трещины на разрушение.

**Практическая значимость.** Научная и практическая ценность работы заключается в исследовании разрушения хрупких образцов с трещиной при одноосном сжатии, исследовании динамики их состояния, волновых процессов и механизмов их разрушения, в определении влияния начальных параметров образцов. Предложенный подход компьютерного моделирования дает исследователям инструмент, который позволяет принимать научно обоснованные решения для постановки физических экспериментов. Расчеты динамики разрушения образцов в двумерной постановке могут быть полезны как необходимый фактический материал при переходе к трехмерной постановке задачи, существенно расширяющей возможности компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** *компьютерное моделирование, хрупкое разрушение, образец с трещиной, метод сглаженных частиц*

**Постановка проблемы.** Решение проблемы разрушения хрупких и квазихрупких твердых тел и горных пород является одной из актуальных задач геомеханики, механики деформируемого твердого тела и строительной механики.

Аналитическое решение задачи об устойчивости хрупких тел, содержащих начальную трещину, при их

сжатии затруднено ввиду сложности и разнообразия процессов, происходящих при этом.

Имеющиеся решения этой задачи [1] получены при определенных упрощениях и допущениях, во многих случаях далеки от реального развития разрушения в хрупких телах с трещинами.

Поэтому вопросам компьютерного моделирования процессов разрушения твердых деформируемых тел и анализу происходящих при этом явлений уделено

внимание во многих исследованиях, а в ряде из них [2] достигнут значительный прогресс в этой области.

В настоящей работе изучение разрушения хрупких материалов и тел проводилось путем установления соответствия результатов его численного моделирования экспериментальным результатам, полученных автором на специально изготовленных модельных образцах.

**Формулирование цели работы.** Одной из главных задач настоящего исследования есть выбор математической модели нагружаемых горных пород и твердых тел конечных размеров, позволяющей в численных расчетах описать процесс разрушения нагружаемых образцов, максимально близко соответствующий наблюдаемому в экспериментах картинам разрушения.

**Изложение основного материала.** Как в экспериментах с модельными образцами, так и в численных расчетах исследовалось разрушение сжатием образцов, содержащих начальную трещинообразную выемку (рис. 1). Для решения задачи используются уравнения механики деформируемого твердого тела, включающие законы сохранения массы и импульса

$$\begin{aligned} \frac{\dot{V}}{V} - U_{i,i} &= 0; \\ \rho \dot{U}_i &= \sigma_{ij,j}. \end{aligned} \quad (1)$$

Тензор напряжения может быть записан как

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}, \quad (2)$$

где  $P$  – давление;  $\delta_{ij}$  – дельта функция Кронекера ( $\delta_{ij} = 1$  при  $i = j$ , иначе  $\delta_{ij} = 0$ );  $S_{ij}$  – девиатор тензора напряжения.

Система (1) замыкается уравнением состояния для определения давления

$$P = K(\rho_0 / \rho - 1), \quad (3)$$

где  $K$  – модуль объемного сжатия, и определяющими соотношениями для девиатора  $S_{ij}$  (закон Гука)

$$\dot{S}_{ij} + \lambda S_{ij} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \dot{\epsilon}_{kk} \right). \quad (4)$$

Дифференцирование по времени в (4) компонент девиатора тензора напряжений проводится в смысле Яумана

$$\dot{S}_{ij} = \dot{S}_{ij} - S_{ik} \omega_{jk} - S_{jk} \omega_{ik}, \quad (5)$$

где  $\omega_{ij} = \frac{1}{2}(U_{i,j} - U_{j,i})$  – мощность энергии формоизменения;  $\lambda$  и  $\mu$  – коэффициенты Ляме; точка над символом означает материальную производную по времени. Величина  $\dot{S}_{ij}$  вводится для того, чтобы обеспечить нулевую скорость изменения напряжённого состояния среды при вращении её отдельных элементов как жёсткого целого.

Множитель  $\lambda$  положителен при пластических деформациях сдвига и тождественно равен нулю при упругом сдвиге. При  $\lambda = 0$  получаются уравнения Гука в дифференциальной форме. Параметр  $\lambda$  можно определить, используя условие пластичности

$$\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{3} Y_0, \quad (6)$$

где  $Y_0$  – предел текучести. В численных расчетах применялась процедура приведения напряжений к кругу текучести, что эквивалентно решению полных уравнений Прандтля-Рейса.

В расчетах среда считается изотропной, а релаксация – мгновенной.

Представленная модель (1)–(4) позволяет описать незначительную неупругую деформацию, предвещающую разрушение хрупких тел и геосред. Эта неупругая деформация отражает макроскопический отклик среды на нагружение за счет дилатантных процессов – накопления в среде мелких повреждений и трещин.

В условиях плоской деформации рассматривается нагружение упругого образца одноосным сжатием между плитами пресса. Начальная геометрия задачи представлена на рис. 1. Для замкнутой системы уравнений (1)–(4) ставится краевая задача с начальными и граничными условиями, состоящими в том, что на свободных поверхностях образца полагается равенство нулю вектора напряжений, а на контактных границах отсутствуют касательные напряжения (случай полного проскальзывания).

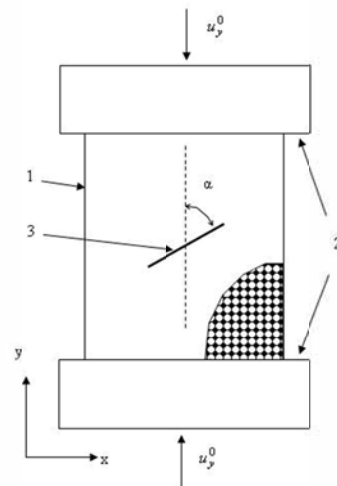


Рис. 1 Начальная геометрия задачи: 1 – образец; 2 – плиты пресса; 3 – трещина;  $\alpha$  – угол наклона начальной трещины;  $x, y$  – декартовы координаты;  $u_y^0$  – скорость движения плит пресса

При решении задачи требуется определить компоненты тензора напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $S_{xy}$  во всех точках образца и компоненты упругих перемещений  $u_x$  и  $u_y$  произвольной точки.

С целью определения оптимального способа компьютерного моделирования, позволяющего получать картины разрушения нагружаемого образца, максимально близко соответствующие наблюдаемым в экспериментах, для решения поставленной задачи выбран метод сглаженных частиц (SPH) [3].

Достоинством метода SPH является возможность расчета смещений с произвольными деформациями при сохранении преимуществ Лагранжевого подхода. Метод SPH – лагранжевый метод, в котором материал разбивается на частицы (рис. 2), для каждой из которых в любой момент времени известны масса, плотность, положение, скорость и напряжения.

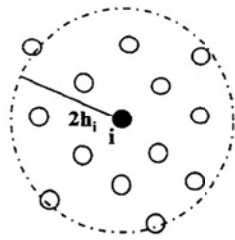


Рис. 2 Окрестность SPH-частицы

Производные, входящие в уравнения (1), вычисляются с помощью сплайн-интерполяции, в соответствии с чем каждая частица является точкой интерполяции, в которой известны параметры деформируемой среды. Численное решение во всей области интегрирования получается с помощью интерполяционных функций, для которых эти частицы являются интерполяционными узлами. Таким образом, вычисление градиентов сводится к аналитическому дифференцированию гладких функций. Пусть есть частица  $x_i$  с массой  $m_i$  и некоторым свойством  $A_i$ . Основная суть метода заключается в приближении формулы

$$A(x) = \int_R A(x_j) \delta(x - x_j) dx$$

цепочкой преобразований. Обобщенную функцию  $\delta$  заменяем аналитической функцией  $W(x - x_j, h)$  – ядром сглаживания с радиусом сглаживания  $h$

$$A(x) = \int_R A(x_j) W(x - x_j, h) dx.$$

Значение  $h$  приблизительно равно характерному расстоянию между частицами, выбранному в расчетах для решаемой задачи.

Тогда, если известны значения этого свойства для частиц, находящихся в некоторой окрестности  $x_i$  (в пределах двух сглаживающих радиусов  $h$ ), то  $A_i$  будет вычисляться как

$$A(x) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(x - x_j, h), \quad (7)$$

где  $\rho_j$  – плотность частицы.

В формуле (7) предполагается, что суммирование ведется по всем частицам, находящимся в пределах двух сглаженных радиусов. Сглаживающая функция такова, что

$$\int_{x-x_i} W(x-x_i) dx = 1 ;$$

$$W(x-x_i, h) = 0; \quad |x-x_i| > 2h .$$

В расчетах используется функция  $W(x, h) = e^{-(x/h)^2}$ , которая удовлетворяет указанным условиям.

Использование такой аппроксимации существенно упрощает вычисление градиента функции, т.к. достаточно аналитически продифференцировать ядро сглаживания, что даст

$$\nabla A(x) = \sum_j \frac{m_j A_j}{\rho_j} \nabla W_j .$$

Численные аппроксимации уравнений механики деформируемого тела (1), построенные с помощью метода SPH, выглядят следующим образом

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (U_j - U_i) \cdot \nabla W_{ij} ;$$

$$\frac{dU_i}{dt} = - \sum_j m_j \left( \frac{\sigma_i}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j}{\rho_j^2} \right) \cdot \nabla W_{ij} .$$

Интегрирование уравнений для  $i$ -й частицы производится по следующей схеме

$$\mathbf{x}_i^{n+1} = \mathbf{x}_i^n + \Delta t \left( \mathbf{u}_i^n + \frac{1}{2} \Delta t \frac{d\mathbf{u}_i^n}{dt} \right) ;$$

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^n + \Delta t \frac{d\rho_i^n}{dt} ;$$

$$\mathbf{u}_i^{n+1} = \mathbf{u}_i^n + \Delta t \frac{d\mathbf{u}_i^n}{dt} ;$$

$$S_i^{n+1} = S_i^n + \Delta t \frac{dS_i^n}{dt} ,$$

причем значения компонентов тензора напряжений  $\sigma_i^{n+1}$  вычисляется с помощью уравнения состояния (3) по вычисленным значениям плотности  $\rho_i^{n+1}$  и дивергенции  $S_i^{n+1}$ .

Для потребностей механики твердого деформируемого тела полезным качеством метода сглаженных частиц является способность представлять разрушение материала в реалистической форме без дополнительных условий и не ставя при этом под угрозу способность проведения дальнейших вычислений. Как только под действием растягивающих напряжений выполняется условие выхода частицы за пределы окрестности, определенной радиусом сглаживания, то исчезает взаимодействие между соседними части-

цами. Таким образом, численно моделируется разрушение материала. В последнее время для более реалистичного описания разрушения материала в методе сглаженных частиц трактовка разрушения за счет его бессеточной основы была объединена с алгоритмом накопления повреждений. Для хрупких материалов используется статистическая теория разрушения Грэди и Киппа [3,4]. Эта теория постулирует уравнение накопления повреждений за счет хрупкого микрорастрескивания, которое задает скорость накопления повреждений пропорционально текущему числу повреждений в единице объема и в соответствии с окружающим напряженно-деформированным состоянием.

Уравнение эволюции повреждений включает пороговый член, равный статическому пределу прочности, и временной параметр, управляющий нормой накопления повреждений. Представление материала в виде Лагранжевых частиц позволяет без затруднений определять разрушение как предельный результат накопления повреждений по простым правилам для кинематических ограничений взаимосвязи между соседними частицами. Повреждение рассматривается как рост неубывающей переменной  $D$ , которая отвечает текущему напряженному состоянию и состоянию поврежденности. Повреждение меняет некоторые свойства материала. В динамических условиях это дает возможность пространственной локализации областей быстро возрастающего повреждения, сопровождающегося размягчением, которое изменяет картину напряженно-деформированного состояния окружающего материала. Это интерпретируется как начало трещинообразования. Поскольку метод сглаженных частиц – интерполяционный бессеточный метод, рассматривающий взаимодействие только в окрестности близлежащих соседних частиц, трактовка разрушения значительно упрощена за счет ослабления связей между поврежденными частицами. Нарушение кинематического ограничения взаимосвязи между частицами ведет к образованию новых границ. Таким образом, меняется краевая задача и требуется введение новых граничных условий. Изменение границ влияет на движение материала и на соответствующее напряженно-деформированное состояние.

Моделирование повреждений за счет растяжения в методе сглаженных частиц состоит из определения скалярной переменной поля повреждений и эволюционной модели отслеживания достижения максимальным главным напряжением порогового значения. Для сдвиговых повреждений используется идеология Джонсона-Кука [3]. Параметр накопления сдвиговых повреждений – также скалярная переменная, определяемая нормализованным интегрированием по времени эквивалентной скорости пластической деформации.

Модель повреждения Джонсона-Кука для сдвиговых повреждений определяется оценочным уравнением, зависящим от эквивалентной скорости пластической деформации

$$\dot{D}_s = \dot{\epsilon}_p / \epsilon_f, \quad (8)$$

где  $\epsilon_f$  – предельная деформация разрушения определяется как

$$\epsilon_f = [d_1 + d_2 \text{Exp}(d_3 \sigma^*)][1 + d_4 \ln(\dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0)][1 + d_5 T^*]. \quad (9)$$

Здесь  $\sigma^*$  – отношение главного напряжения ( $-P$ ) к эквивалентному напряжению  $\sqrt{3J_2}$ , где  $J_2$  – второй инвариант девиатора тензора напряжений. Температура  $T^*$  – константа материала [3].

Эволюционное уравнение для повреждений, вызванных растягивающими напряжениями, постулируется как

$$\dot{D}_t = [(\sigma_{max} - \sigma_{th}) / \sigma_{th}^0]^2 / [t_d(1 - D_t^2)], \quad (10)$$

где полагается, что  $\dot{D}_t = 0$  для  $\sigma_{max} \leq \sigma_{th}^0$ . Накопление повреждений происходит тогда, когда максимальное главное напряжение  $\sigma_{max}$  превышает заданное пороговое значение напряжения растяжения  $\sigma_{th}^0$ . Параметры модели  $t_d$  – временная константа, которая управляет нормой накопления повреждения, а  $\sigma_{th}^0$  – пороговая поврежденность материала, которая обычно берется равной статическому пределу прочности материала при растяжении. Член  $1/(1 - D_t^2)$  в (10) несет свойство уменьшения эффективной временной константы по мере накопления повреждений и увеличивает локализацию. Как в модели разрушения за счет сдвига, так и в модели разрушения за счет растягивающих напряжений значения соответствующих параметров поврежденности лежат в диапазоне  $0 \leq D \leq 1$ , где 0 соответствует неповрежденному материалу, а 1 – полностью поврежденному материалу.

Важным свойством этих параметров повреждения является их взаимодействие и обратная связь с другими параметрами напряженно-деформированного состояния.

Полагается, что ослабление, размягчение и расцепление, как следствие поврежденности, функционально задается через модули

$$\begin{aligned} \sigma_{th} &= (1 - D_s^2)(1 - D_t^2)\sigma_{th}^0; \\ K &= (1 - D_t^2)K_0; \mu = (1 - D_t^2)\mu_0; Y = (1 - D_t^2)Y_0; \\ h &= \text{Max}[(1 - D_t^2)h_0, 0.3h_0]. \end{aligned} \quad (11)$$

Считается, что размягчение материала от повреждения, вызванного растяжением, уменьшает модуль объемного сжатия  $K$ , модуль сдвига  $\mu$  и предел текучести  $Y$  от их базовых значений для неповрежденного материала  $K_0$ ,  $\mu_0$  и предела текучести  $Y_0$  в (11) соответственно. Последнее выражение в (11) уменьшает радиус сглаживания  $h$  от его значения  $h_0$  для неповрежденного материала с ограничением 30% от изначального значения. Это простой способ представить действие разрушения на взаимосвязь между ча-

стицами через радиус сглаживания. Компоненты сжимающих напряжений не уменьшаются по мере разрушения, так как материал в области разрушения остается способным к передаче сжимающих усилий.

На рис. 3, б показана, полученная в результате расчетов, картина разрушения хрупкого образца с начальной трещиной при угле ее наклона  $\alpha = \pi/3$  в сравнение с экспериментом (рис. 3, а), с расчетами методом работы [3] (рис. 3, в) и работы [6] (рис. 3, г). Оказывается, что значительные неупругие деформации (повреждения), показанные черным цветом, локализованы в полосах, ориентация которых может меняться в широких пределах от нескольких до десятков градусов [2]. Видно, что картина и направления вновь образующихся трещин, полученная подходом, предложенным в данной работе, соответствует наблюдаемому в эксперименте. Из рис. 3 следует, что зарождение вертикальных трещин происходит у границ начальной трещины, да-

лее они распространяются в обоих направлениях от трещины. В методе работы [3], в углах образца были заданы области с пониженными прочностными характеристиками в качестве незначительных начальных повреждений, дающих возможность распространения трещин, схожих с наблюдаемыми в экспериментах. На свободных боковых поверхностях образцов происходит разрушение вблизи его углов. Повидимому, при проведении экспериментов на образование трещин вблизи углов образца повлияло наличие трения, что привело к зарождению повреждений на начальных этапах деформирования. Если при моделировании задать вблизи углов такие незначительные повреждения ( $\approx 5\%$ ), то в результате расчетов трещины вблизи углов развиваются одновременно с центральными. Если же таких начальных повреждений не задавать, то свободные поверхности образца и его углы разрушаются на более поздних стадиях деформирования.

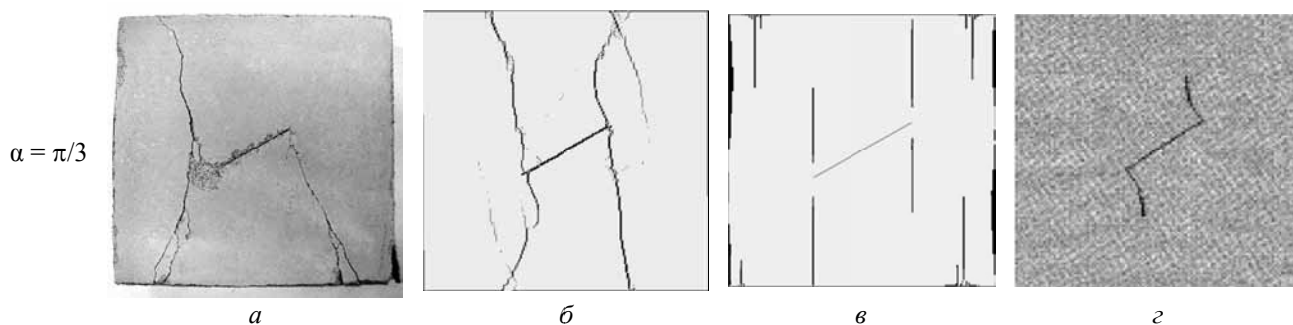


Рис. 3. Сравнение результатов расчета разупрочнения пород методом сглаженных частиц (б) с экспериментом [5] (а) и расчетами, представленными в работах [3](в) и [6](г)

При выполнении расчетов процесса разрушения образца, в случае ортогональной ориентации начальной трещины к вертикали ( $\alpha = \pi/2$ ), принималось, что образец мог свободно проскальзывать относитель-

но плит пресса. В этом случае трещины также зарождаются у границ начальной трещины и распространяются в обоих направлениях по вертикали, как показано на рис. 4.

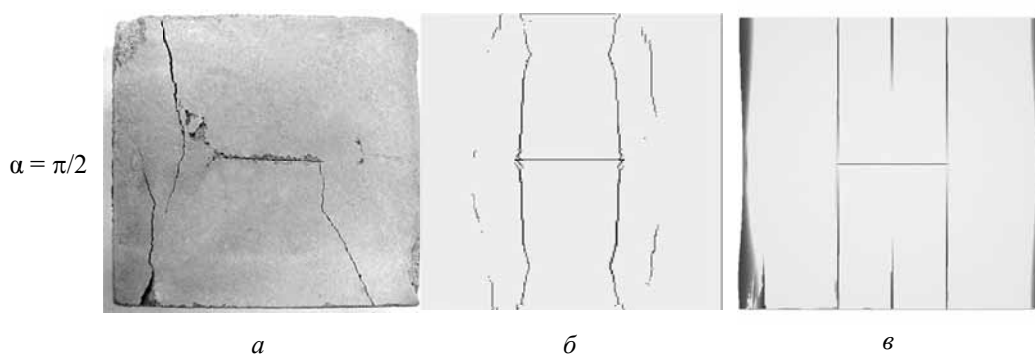


Рис. 4. Сравнение результатов расчета разупрочнения пород методом сглаженных частиц (б) с экспериментом (а)[6] и расчетами, представленными в работе [7](в)

При большем значении общей деформации происходит разрушение углов и тонкого слоя вблизи свободной поверхности. Приведенные на рис. 3 и 4 картины разрушения, полученные в результате расчетов с учетом различия значений прочности среды при сжа-

тии и растяжении, а также накопления повреждений, достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментов.

Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными показывает, что ис-

пользование метода сглаженных частиц (SPH) позволяет достаточно точно рассчитывать задачи деформирования и разрушения образцов с начальной трещиной при  $\pi/3 < \alpha < \pi/2$ . Однако, как следует из рис. 5, при  $\alpha \leq \pi/4$  результаты SPH-моделирования в меньшей степени соответствуют картинам разрушения, получаемым в эксперименте.

Полученные в результате расчетов картины разрушения и деформации образцов из ПЦМ в достаточной степени соответствуют характеру их разрушения, который проявлялся при выполнении экспериментов. Увеличение объема разрушенного материала вблизи вершин начальной трещины свидетельствует о преобладании растягивающих напряжений в этих областях. В них деградация прочности идет значительно интенсивнее и наиболее вероятным механизмом разрушения будет разрушение отрывом. Вместе с тем, макроскопические трещины, растущие из вершин начальной трещины, представляют собой совокупность вертикальных мезотрещин.

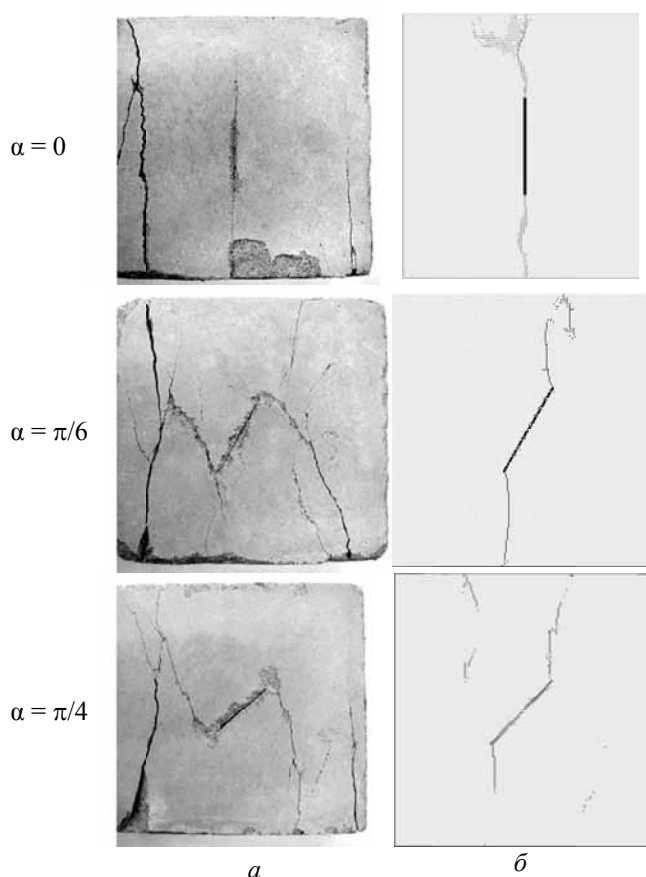


Рис. 5. Характер результатов расчета образования трещин методом сглаженных частиц (б) с экспериментом [б] (а)

#### Выводы и перспективы развития направления.

Используемая модель динамического разрушения горной породы наглядно воспроизводит рост трещин в хрупком образце путем ослабления взаимосвязей между частицами материала и формирования новых

свободных поверхностей. При превышении предела прочности происходит рост трещин с ослаблением поля напряжений за счет образования новых поверхностей на берегах трещин. Растягивающие и напряжения сдвига за счет возникшей фрагментации ведут к уменьшению параметров напряженно-деформированного состояния и скорости звука, т.е. к накоплению повреждений в горной породе. Такого рода разрушения актуальны при сжимающих напряжениях, например, наблюдаемых в горных массивах, ослабленных выработками и в тектонических разломах.

Поскольку микротрещины в пределах каждой частицы растут по той же идеологии, что и явные макротрещины, используемая модель представляет независимую от масштаба физику разрушения.

Возможности предложенного подхода к моделированию разрушения проиллюстрированы на исследовании развития трещин при одноосном сжатии хрупких образцов с начальной выемкой в сравнении с экспериментальными данными и с расчетами другими методами. Во всех случаях результаты, полученные путем изложенного подхода моделирования, достаточно точно соответствуют эксперименту и более реалистичны.

Численное моделирование методом сглаженных частиц с использованием комбинированной модели накопления средой повреждений в ходе ее нагружения (8–11), учитывающей различие величин предельной прочности материала на растяжение и на сжатие, в совокупности с трактовкой разрушения за счет бесстochastic основы метода, способствует более качественному изучению и лучшему пониманию физических процессов, происходящих при деформировании и разрушении.

Полученные результаты исследования являются базовыми для разработки перспективных направлений методологических и научных исследований.

#### Список литературы / References

1. Гузь А.Н. Построение основ теории устойчивости горных выработок / А.Н. Гузь // Успехи механики: в 6-ти томах. – 2008. – Т. 4. – С. 93–128.
2. Graya, J.P. and Monaghan, J.J. (2004), “Numerical modelling of stress fields and fracture around magma chambers”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 135, pp. 259–283.
3. Моделирование разрушения хрупких и квазихрупких тел и геосред / М.О. Еремин, Ю.А. Костандов, П.В. Макаров [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – № 3. – С. 35–44.
4. Kostandov, Yu.A., Makarov, P.V., Yerebin, M.O., Shipovskii, I.Ye. and Smolin, I.Yu. (2012), “Simulation for failure of fragile and quasi-fragile bodies and geoenvironments”, *Fizicheskaya Mezomekhanika*, vol. 15, no. 3, pp. 35–44.
4. Wilkins, Mark L. (1999), *Computer simulation of dynamic phenomena*, Springer.

5. Libersky, L.D. and Randles, P.W. (1996), "Smootred Particle Hydrodynamics: Some recent implements and applications", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 139, pp. 375–408.

6. Костандов Ю.А. Влияние ориентации начальной трещины и контактного трения на разрушение хрупких тел / Ю.А. Костандов, В.С. Медведев // Геотехническая механика: Межведомств. сб. науч. трудов – 2012. – Вып. 97. – С. 231–240.

Kostandov, Yu.A. and Medvedev, V.S. (2012), "Dependence of durability of fragile bodies at their compression from a pin friction and orientation of initial crack", *Geotekhnicheskaya Mekhanika*, no. 97, pp. 231–240.

7. Стефанов Ю.П. Численное моделирование процессов деформации и разрушения геологических сред: автореф. дис. на соискан. научн. степени д-ра физ.-мат. наук / Стефанов Ю.П. – Томск: Ин-т физики прочности и материаловедения СОРАН, 2008. – 30 с.

Stefanov, Yu.P. (2004), "Numeral Simulation of Processes of Deformation and Destruction of Geological Environments", Abstract of Dr. Sci. (Phys.-Math.) dissertation, Institute of Strength Physics and Materials Science under NAS of Russia, Tomsk, Russia.

**Мета.** Визначення впливу наявності тріщин на напружено-деформований стан (НДС) і характер руйнування матеріалу, а також оцінка можливостей вибраного розрахункового підходу до рішення завдань крихкого руйнування.

**Методика.** За допомогою комп'ютерного моделювання методом згладжених часток SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) досліджується поведінка крихких зразків при одновісному стискуванні. Визначені основні параметри: розподіл напруги, що виникає при вантажненні, а також утворення областей руйнування у зразках.

**Результати.** При одновісному стискуванні отримані картини руйнування крихких зразків з початковою центральною тріщиною різної орієнтації, що показують вплив орієнтації тріщини на характер руйнування. Використання методу згладжених часток дозволяє досить точно розраховувати завдання деформації та руйнування зразків з наявністю тріщин.

**Наукова новизна.** Розроблена й реалізована вибрана обчислювальна технологія для вирішення даного класу завдань. Шляхом комп'ютерного моделювання визначений вплив тріщини на руйнування.

**Практична значимість.** Наукова й практична цінність роботи полягає в дослідженні руйнування крихких зразків з тріщиною при одновісному стискуванні, дослідженні динаміки їх стану, хвилових процесів і механізмів їх руйнування, у визначенні впливу початкових параметрів зразків. Запропонований підхід

комп'ютерного моделювання дає дослідникам інструмент, що дозволяє приймати науково обґрунтовані рішення для постановки фізичних експериментів. Розрахунки динаміки руйнування зразків у двовимірній постановці можуть бути корисні як необхідний фактичний матеріал при переході до тривимірної постановки завдання, що істотно розширює можливості комп'ютерного моделювання.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, крихке руйнування, зразок з тріщиною, метод згладжених часток

**Purpose.** Determination of the influence of cracks presence on the stress-strain state and character of failure of a material, and also estimation of possibilities of the chosen calculation approach to solving the task of fragile fracture.

**Methodology.** By means of computer simulation by the SPH code (Smooth Particle Hydrodynamics) we have investigated the behavior of fragile samples under linear compression. The following basic parameters have been determined: distribution of tensions arising under loading, and formation of areas of destruction in samples.

**Findings.** We have obtained fracture patterns caused by linear compression of fragile samples with the initial central crack of different orientation. They show the influence of orientation of the crack on the fracture behavior. The use of SPH code allows us to estimate the tasks of deformation and fracture of fragile samples with cracks adequately.

**Originality.** The chosen computational technology has been developed and put into effect for solution of the considered class of tasks. The influence of cracks on fracture has been determined by computer simulation.

**Practical value.** The scientific and practical value of the work consists in the study of destruction of fragile samples with a crack under the linear compression, dynamics of the state of the samples, wave processes and mechanisms of their destruction; determination of the influence of the sample initial parameters. The suggested approach to computer design gives us an instrument that allows making scientifically reasonable decisions for setting up physical experiments. The sample destruction dynamics calculations in the two-dimensional design can be useful as necessary actual material in transition to the three-dimensional task, which extends the possibilities of computer design substantially.

**Keywords:** computer design, fragile destruction, sample with a crack, SPH code

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук С.П. Мінсєвим. Дата надходження рукопису 13.01.14.*