

УДК 622.831; 622.2; 622.235

**П.К. Федотов**

РАЗРУШЕНИЕ РУДЫ В РОЛЛЕР-ПРЕССАХ

Одним из эффективных способов дезинтеграции руды является разрушение ее в роллер прессах. До сих пор не определен механизм разрушения руды в роллер прессах, не известны причины высокой эффективности данных аппаратов. В данной работе представлена математическая модель разрушения руды в слое частиц между валками роллер пресса. Представлен механизм межчастичного разрушения руды.

Ключевые слова: дезинтеграция, роллер-пресс, метод конечных элементов (МКЭ), микротрещины, дробление, измельчение, трещина, напряжение, селективность, разрушение.

При дроблении и измельчении минерального сырья тратится огромное количество энергии, вместе с тем, необходимо признать, что значительная ее часть расходуется неэффективно вследствие несовершенства дробильно-измельчительных машин. Анализ работы традиционных аппаратов, применяемых для дробления и измельчения руд, показывает ряд значительных недостатков, как самих механизмов, так и применяющихся технологических схем с их использованием. По-прежнему остается высоким энергопотребление, процессы разрушения в основном протекают хаотично и не поддаются регулированию [1]. В настоящее время известны аппараты, использующие принципы рационального разрушения, в частности роллер-пресс (рис. 1).

Анализ схем рудоподготовки позволил выделить преимущества данного аппарата: снижение энергозатрат при разрушении руды на 30—40 %, в сравнении со схемой с применением только шаровой мельницы, снижения размера питания шаровой мельницы и коэффициента измельчаемости при совместном их применении. Промышленные и лабораторные исследования разрушения руд в роллер-прессах ведутся в основном зарубежными учеными, большинство из них основаны на практических данных.

К сожалению, недостаточно полно исследован механизм разрушения руды в роллер-прессе и основные причины высокой эффективности данных аппаратов. Обратимся к теории разрушения материалов, и попытаемся объяснить, что происходит с рудой в слое между валками [2].

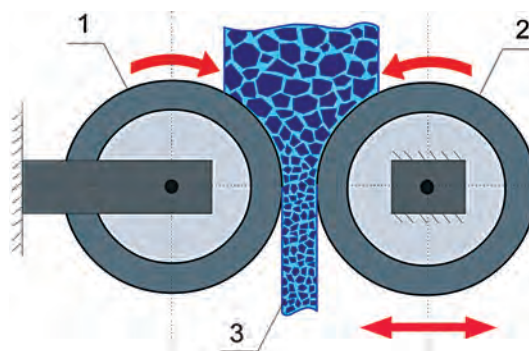


Рис. 1. Схема реализации разрушения руды в роллер-прессе: 1 — неподвижно закрепленный валок, 2 — подвижный валок, 3 — разрушенная руда, спрессованная в агломерат

В механике разрушения, основу которой составляет теория трещин, важно знать условия локального разрушения. Для суждения о прочности тела недостаточно располагать решением теории упругости о концентрации напряжений около трещин. Необходимы, еще так называемые критерии прочности, по которым определяется момент или процесс распространения трещин. В работах профессора А.Н. Ставрогина, на основе многолетних экспериментальных исследований принята концепция о существовании двух видов прочности твердых тел: прочность на разрыв и прочность на срез (сдвиг). Предложены все три вида предельного состояния в виде уравнений экспоненциального вида: $\tau_Y = \tau_Y^0 \ell^{BC}$, $\tau_P = \tau_P^0 \ell^{AC}$, $\tau_O = \tau_O^0 \ell^{OC}$ [3]. Каждое из представленных экспоненциальных уравнений означает соответственно условия: предельных упругих состояний, пределов прочности и пределов остаточной прочности. На основе экспериментальных данных и выражений для исследуемых деформируемых тел, в виде горных пород, в качестве предела прочности используются максимальные сдвиговые (касательные) напряжения в них.

Таким образом, на основе анализа экспериментально-аналитических данных можно утверждать, что при расчете напряженного состояния материала при деформации его между валками роллер прессы, целесообразно и допустимо в качестве основной характеристики прочности горных пород использовать предельное значение сдвиговой составляющей напряженного состояния. В качестве предельного по сдвиговым напряжениям значения использовать предел упругости, так как пределы прочности и запредельной прочности имеют у большинства видов горных пород на порядок меньшую зону (область) существования, а также высокий коэффициент хрупкости. Для изучения напряженного состояния горных пород в условиях неравнокомпонентного сжатия оправдано использование данных о свойствах горных пород, полученных экспериментально в условиях одноосного сжатия, при минимальных значениях на образцах бокового давления σ_2 [4].

Построение математической модели в данной работе основано на численном решении метода конечных элементов (МКЭ) с использованием принципа минимизации функционала потенциальной энергии рассматриваемой деформируемой системы, включающего энергию сил сопротивления и работу сил разрушения породы в условиях неравно-компонентного бокового сжатия [5].

МКЭ заключается, по существу, в аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью подобластей (конечных элементов), имеющих конечное число степеней свободы. Дальнейший ход решения задач по МКЭ сводится к вариационной минимизации функционала рассматриваемой физической задачи. Для задач механики деформируемого тела используется принцип стационарности или минимума функционала виртуальной работы.

В модели используется два вида граничных условий кинематического закрепления (рис. 2): на валке слева воздействие только силового момента вращения $M_{кр}$; на валке справа, кроме силового момента вращения, дополнительное воздействие осевой сжимающей силы $F_{осев}$. Относительно исходных данных производится расчет величины используемой в моделях внешней нагрузки, в виде сжимающей силы $F_{осев}$ и моментов на валках $M_{кр}$.

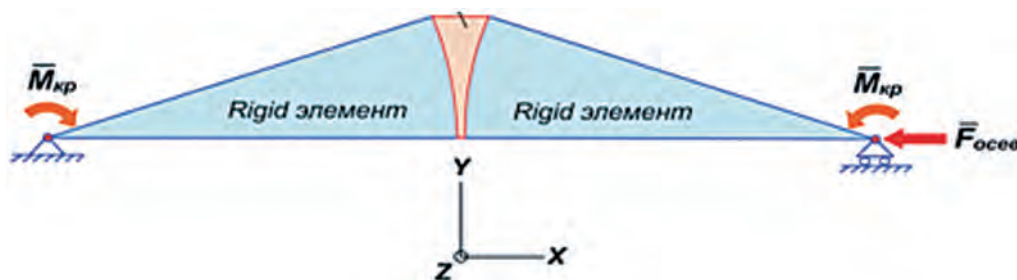


Рис. 2. Граничные условия и условия нагружения в модели МКЭ

Построение сетки модели МКЭ для рассматриваемой области определения, производилось на одной форме и размерах канала между валками но с различным типоразмером объемов разрушаемой породы (форма кубическая, длина ребра 5 и 10 мм). Построение осуществляется с применением двух типов конечных элементов, типа solid (объемное тело): изопараметрического гексаэдра и призматического, используемых для моделирования разрушаемых объемов породы и пространства между объемами породы, а также Rigid-элементов, абсолютно твердых, не деформируемых, для моделирования валков [6].

Для оценки влияния размеров породы на условия ее разрушения в роллер прессе была разработана математическая модель МКЭ разрушения образцов породы между валками под давлением, в которой при исследовании геометрические размеры объемов взяты не одинаковыми. Изучение фрагмента слоя между валками роллер прессы подтвердило, что различие в геометрических размерах объемов разрушаемой породы в одном деформируемом слое не оказывают никакого влияния на принцип разрушения объемов породы в рассматриваемом технологическом процессе дробления.

Математическая модель МКЭ предназначена для оценки напряженного состояния объемов горной породы в процессе ее разрушения под давлением во всем слое между валками роллер прессы. Дополнительной вариативностью в исследовании являлось использование двух типов материала, характерных для образцов горных пород: кварц и сланец. Они отличаются модулем упругости и пределом прочности, кварц: $E=67000$ МПа, $\mu=0.17$; сланец: $E=30000$ МПа, $\mu=0.1$; для песка, заполняющего пространство между объемами породы: $E=15000$ МПа, $\mu=0.1$ [7].

На рис. 3, 4, 5, 6 представлена визуализация результатов исследования, в виде картин напряжений: нормальных вдоль оси X и касательных (сдвиговых) напряжений в исследуемом фрагменте слоя породы, для материала разрушаемой породы – кварца и сланца.

Для анализа результатов, а также реализации целей проведенного численного эксперимента, величины рассматриваемых напряжений представлены, в виде диаграмм изменения величин сдвиговых и сжимающих напряжений (рис. 7, 8, 9, 10), по высоте слоя дробления. Штриховой линией показана зона разброса всплесков напряжений в местах их концентрации в объеме породы, а срединная линия диаграммы, вдоль высоты слоя породы обозначает закон изменения среднего

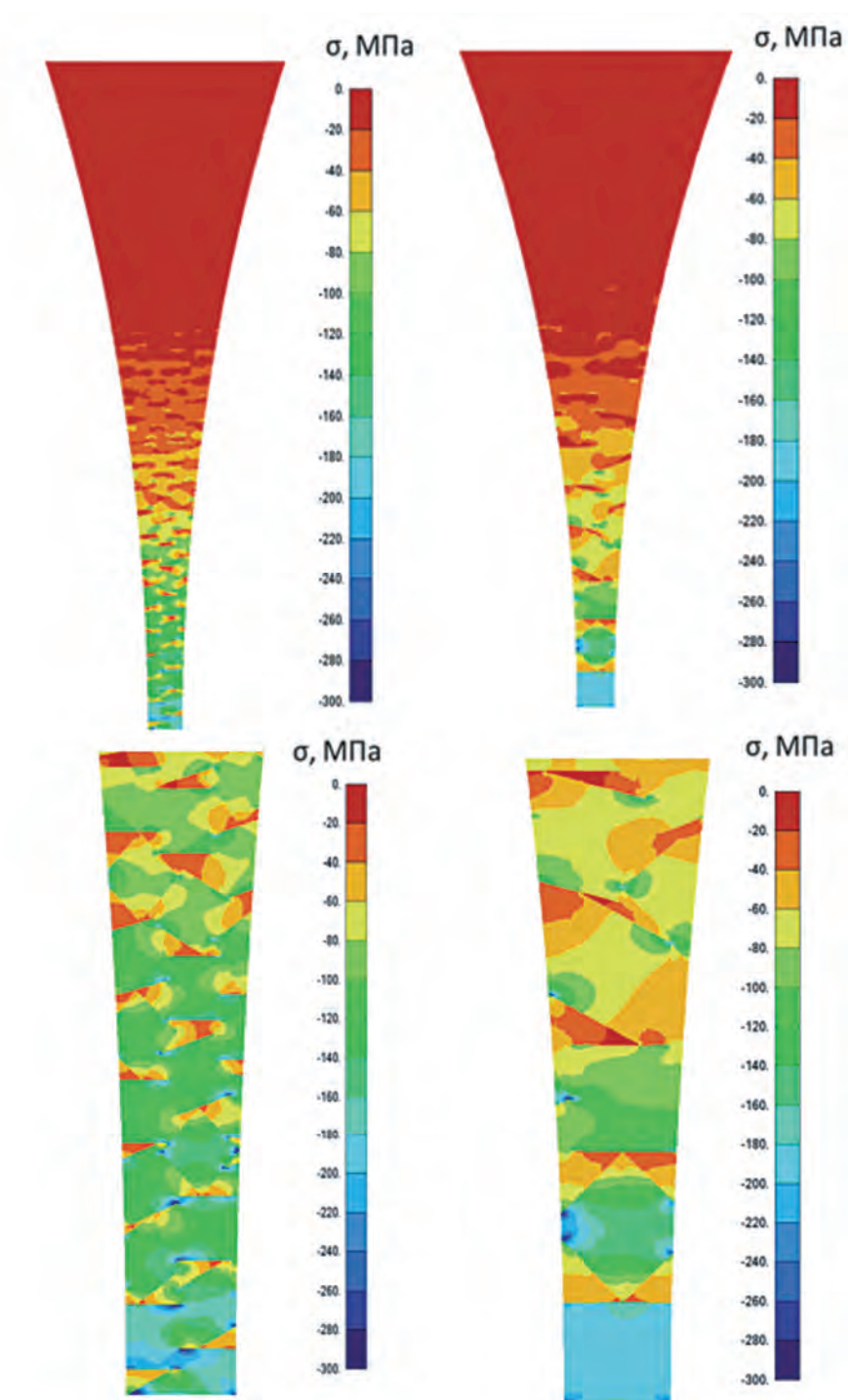


Рис. 3. Величина сжимающих напряжений вдоль оси X, материал — кварц, размер деформируемых объемов 5 и 10 мм

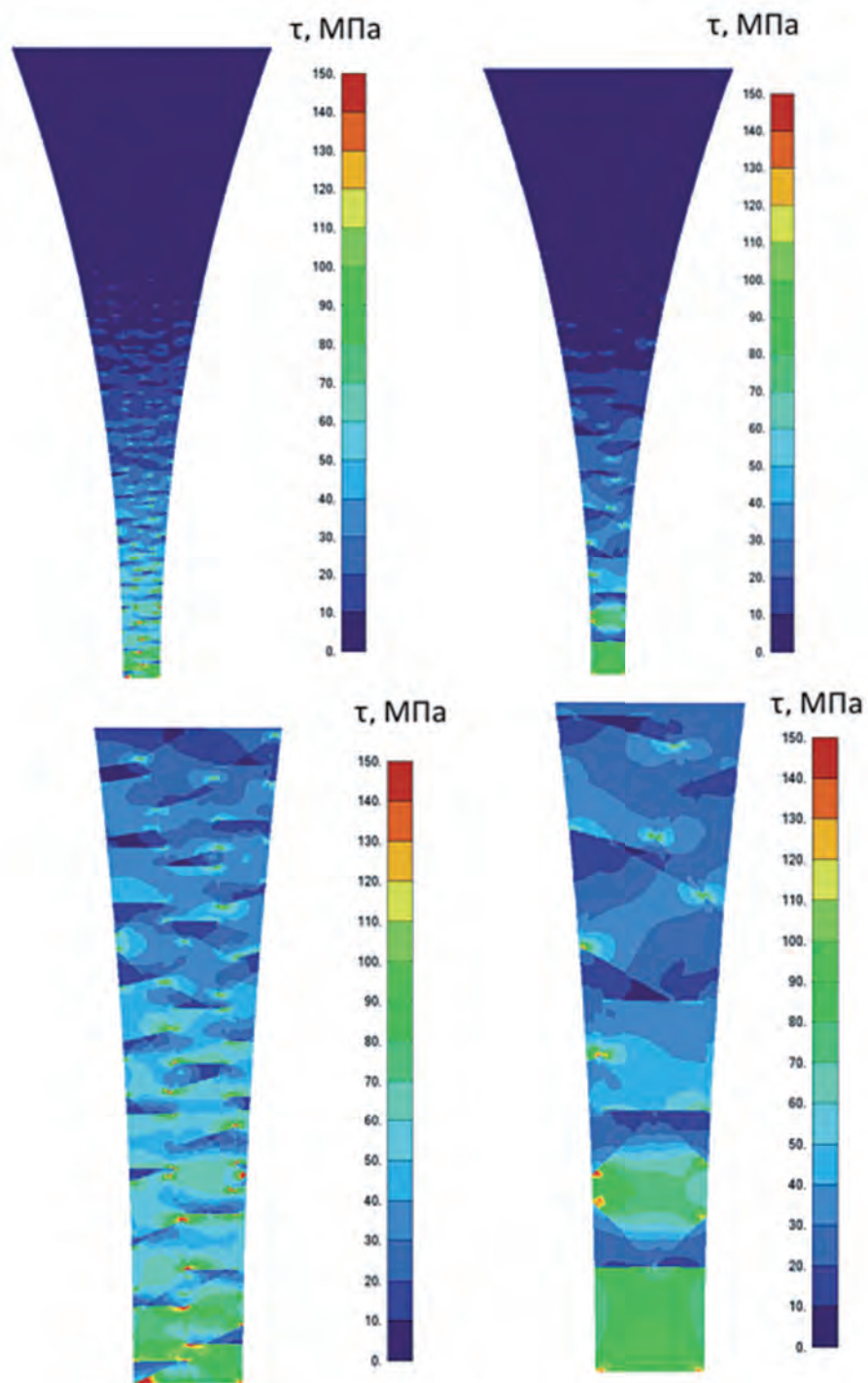


Рис. 4. Величина сдвиговых напряжений, материал — кварц, размер деформируемых объемов 5 и 10 мм

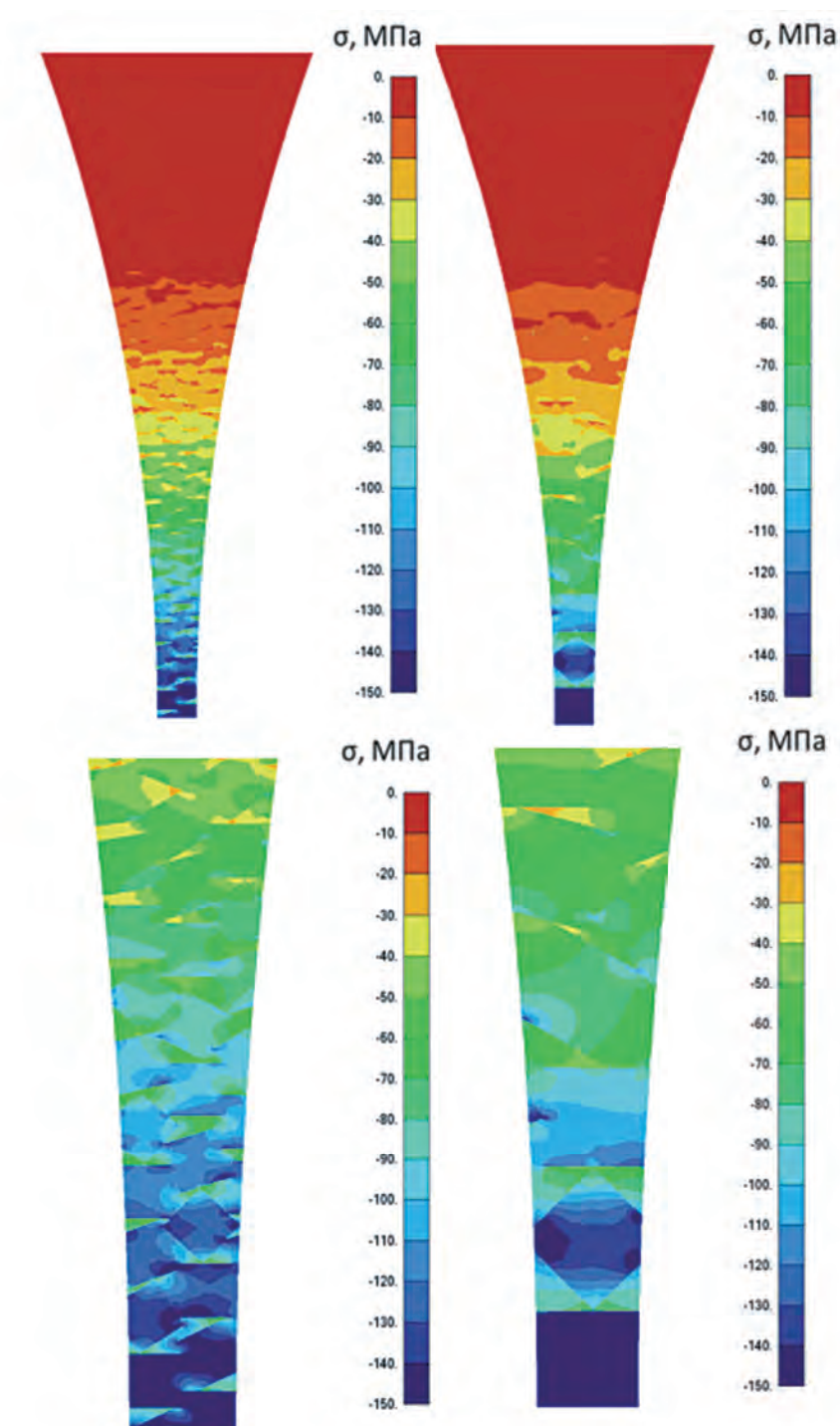


Рис. 5. Величина сжимающих напряжений вдоль оси X, материал — сланец, размер деформируемых объемов 5 и 10 мм

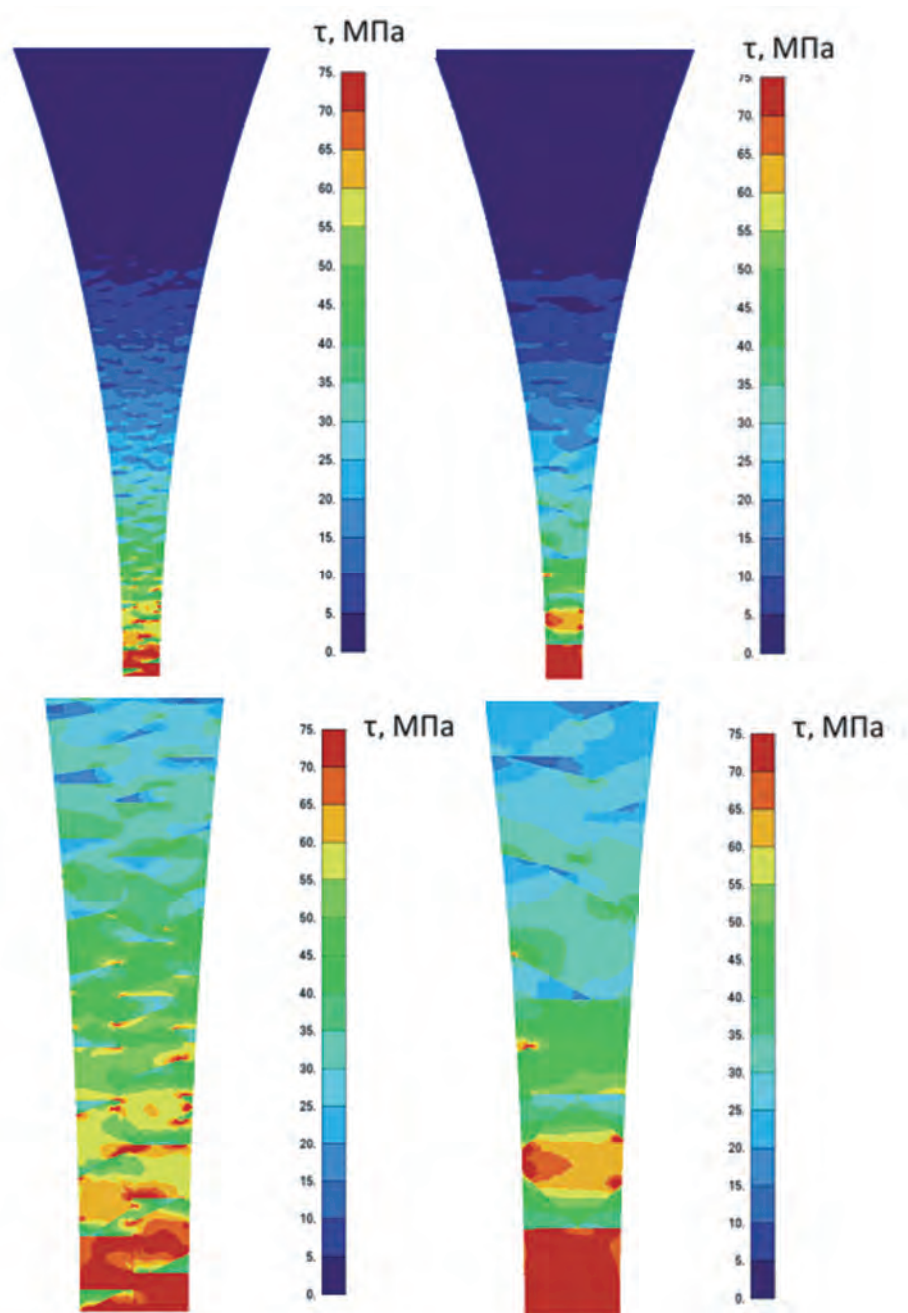


Рис. 6. Величина сдвиговых напряжений, материал — сланец, размер деформируемых объемов 5 и 10 мм

уровня напряжений в слое. Представленные диаграммы показывают что, средний уровень напряжений в слое не достигает предела прочности (кварц — $\tau_{\max}=150$ МПа, $\sigma_{\max}=300$ МПа, сланец — $\tau_{\max}=75$ МПа, $\sigma_{\max}=150$ МПа),

однако появляются зоны концентраций, где уровень напряжений превышает предел прочности. Таким образом, выявлено наличие мест концентраций напряжений, являющихся причиной более скорого разрушения материала [8].

Концентрации наблюдались на различных типах материала при различных параметрах работы роллер пресса, это говорит о его универсальности и соответственно возможности применения на различных типах руд.

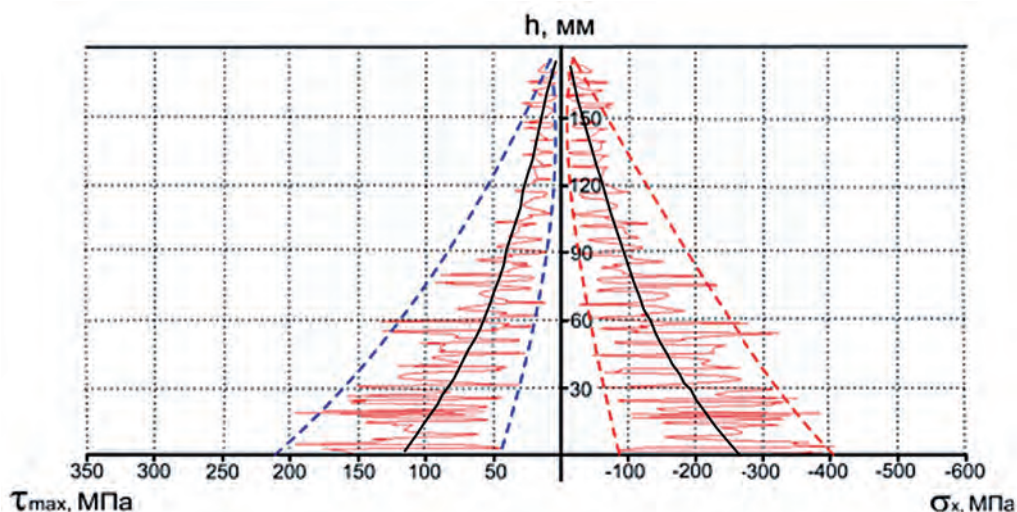


Рис. 7. Диаграммы изменения сдвиговых и сжимающих напряжений разрушаемых объемах породы на поверхности вала, материал – кварц, размер деформируемых объемов 5 мм

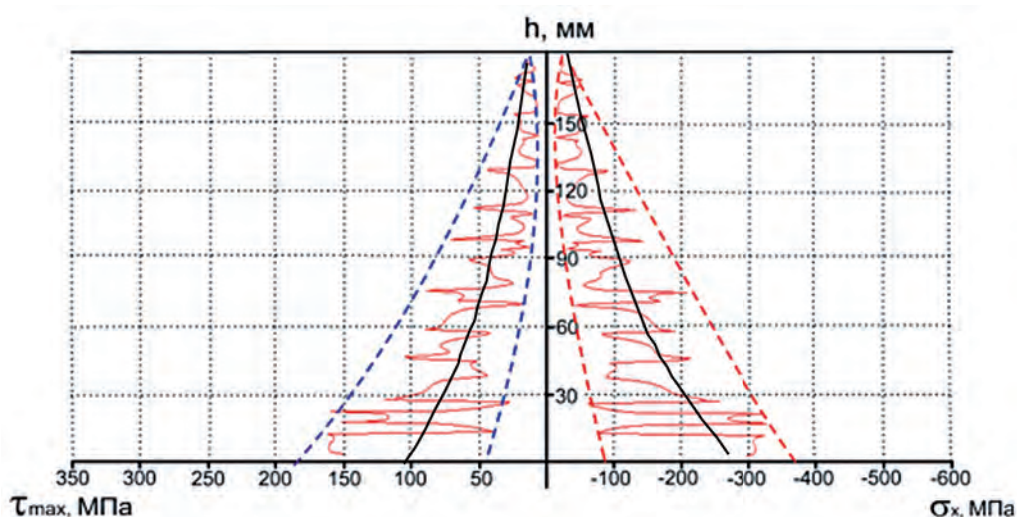


Рис. 8. Диаграммы изменения сдвиговых и сжимающих напряжений в разрушаемых объемах породы на поверхности вала, материал – кварц, размер деформируемых объемов 10 мм

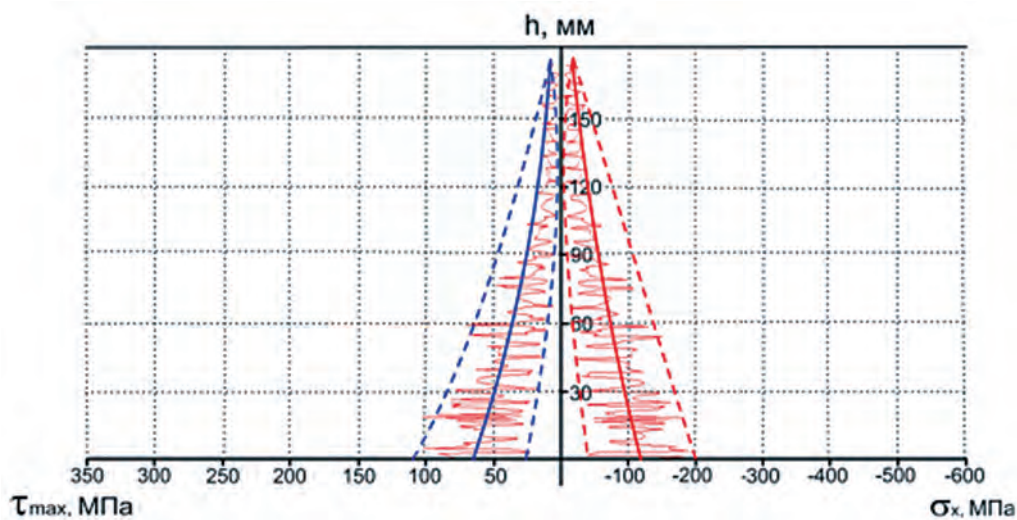


Рис. 9. Диаграммы изменения сдвиговых и сжимающих напряжений в разрушаемых объемах породы на поверхности валка, материал – сланец, размер деформируемых объемов 5 мм

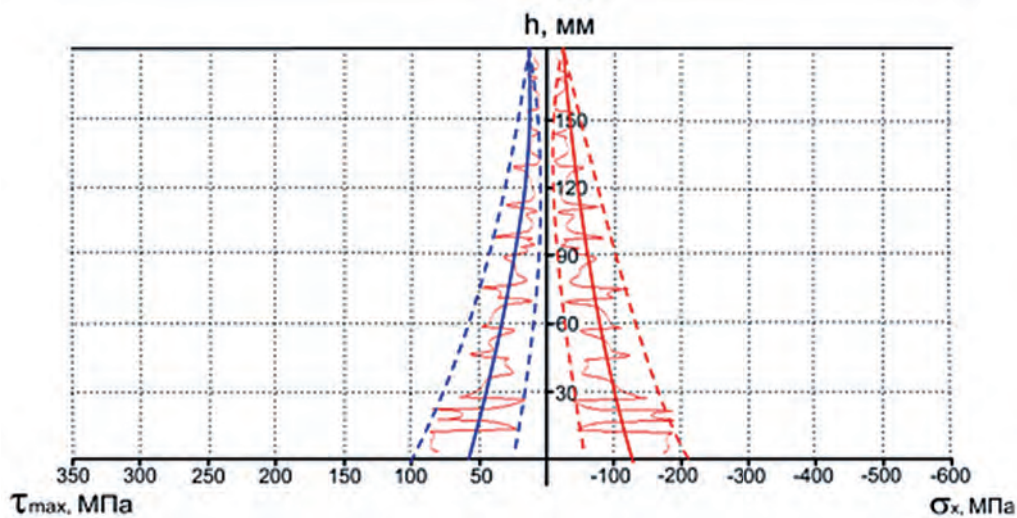


Рис. 10. Диаграммы изменения сдвиговых и сжимающих напряжений в разрушаемых объемах породы на поверхности валка, материал – сланец, размер деформируемых объемов 10 мм

На рис. 11 представлена картина сдвиговых напряжений в слое дробления породы в валках под давлением, где дополнительно выделен фрагмент слоя. Этот фрагмент обозначает место расположения уровня начала процесса разрушения породы, с точки зрения появления в ней предельных значений сдвиговых напряжений [9].

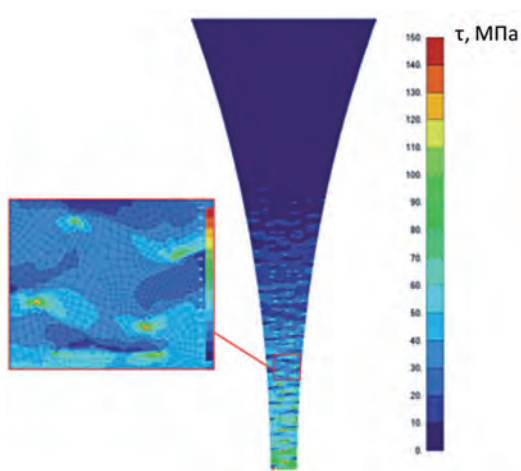


Рис. 11. Картина сдвиговых напряжений в слое дробления породы в валках под давлением, где дополнительно выделен фрагмент слоя

На рис. 12 имеет место, 4 зоны концентрации по его контуру, проявленных красным цветом, в 3-х из которых сдвиговые напряжения близки к пределу прочности материала.

На рис. 13 по контуру этого объема показаны эпюры величины сжимающих нормальных напряжений, которые наглядно показывают, что в местах концентрации наблюдается

высокий градиент нормальных напряжений, что, в свою очередь, означает высокие параметры сдвига.

Из наличия на рассматриваемом объеме явно выраженной плоскости сдвига между двумя впадинами по нормальным напряжениям, следует, что разрушение объемов породы наступит раньше ожидаемого.

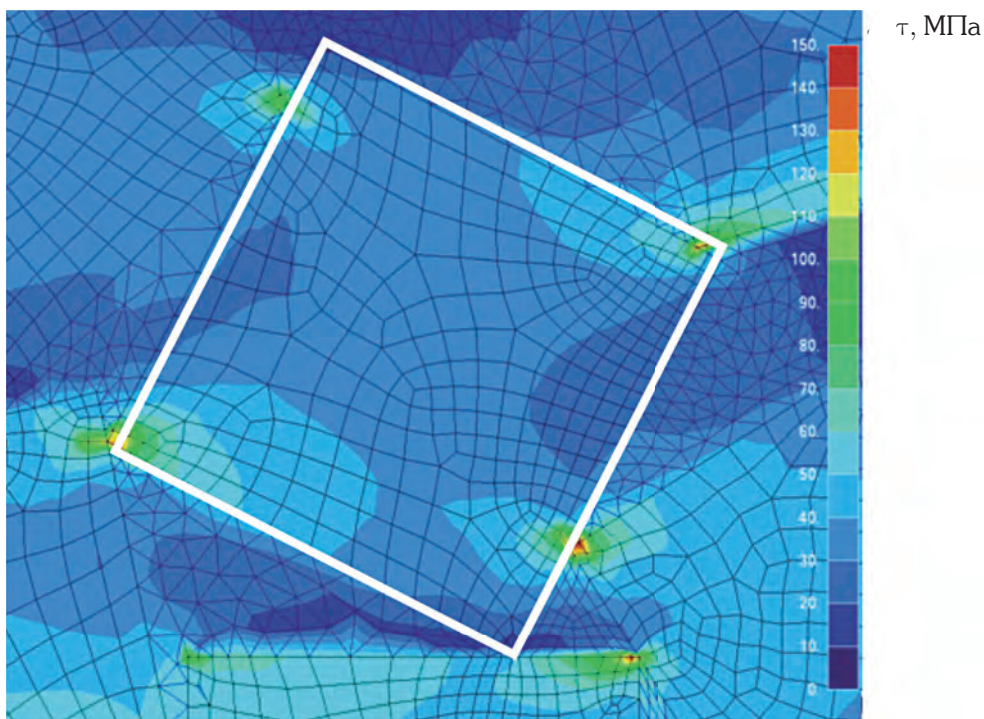


Рис. 12. Картина сдвиговых напряжений, с появлением на объеме породы предела упругости (пропорциональности)

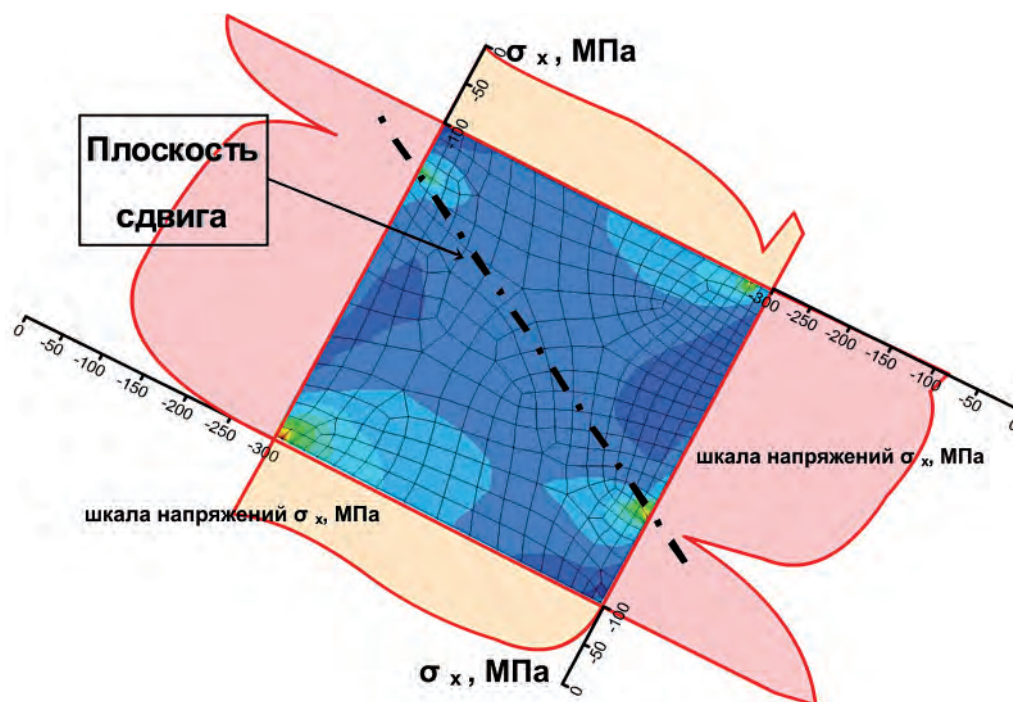


Рис. 13. Эпюра нормальных напряжений по контуру (границе) объема

Таким образом, механизм разрушения материала в слое между валками основан на наличие мест концентраций напряжений и градиента нормальных напряжений.

Так же было, проведено сравнение величин удельной потенциальной энергии деформации разрушения руды в поршневом прессе и в валках под давлением. Общее соотношение величин плотности потенциальной энергии деформации в двух представленных типах разрушения составляет порядок примерно равный четырем. Данное соотношение позволяет сделать вывод о том, что сбережение энергии при дезинтеграции руды в слое происходит, прежде всего, на стадии самого разрушения [10].

Заключение

В результате выше представленных исследований выяснено, что:

- в качестве основной характеристики прочности горных пород возможно использовать предельное значение сдвиговой составляющей напряженного состояния, а в качестве предельного по сдвиговым напряжениям значения использовать предел упругости;
- выявлено наличие мест концентраций напряжений, являющихся причиной более скорого разрушения материала;
- за счет наблюдаемых концентраций напряжений предельное по прочности состояние разрушаемого объема наступает гораздо раньше, чем оно бы имело место при среднем уровне напряжений, который соответствует уровню напряжений при разрушении материала в поршневом прессе;

— механизм разрушения материала в слое между валками основан на наличие мест концентраций напряжений и градиента нормальных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лейбовиц А. Разрушение. Т.7, Ч.1. Неорганические материалы / А. Лейбовиц — М.: Мир, 1967. — С. 61—128.
2. Патцельт Н. Измельчение высоким давлением – задачи в новом тысячелетии / Н. Патцельт, Г. Кнехт, Э. Бурхардт, Р. Климовски // Доклады 7-й конф. операторов мельниц, — Калгари, 2002. — С. 21—23.
3. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость горных выработок на больших глубинах / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. — М.: Недра, 1985. — 271 с.
4. Ставрогин А.Н. Экспериментальная физика и механика горных пород / А.Н. Ставрогин, Б.Г. Тарасов – СПб.: Наука, 2001. — 342 с.
5. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC.Nastran for Windows / Д.Г. Шимкович. — М.: ДМК Пресс, 2001. — 448 с.
6. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. / Отв. ред. В.Е. Панин; Рос. АН, Сиб. отд., Ин — т физики прочности и материаловедения — Новосибирск: Наука, 1995. — 250 с.
7. Дашко Р.Э. Механика горных пород: Учебник для вузов / Р.Э. Дашко. — М.: Недра, 1987. — 264 с.
8. Федотов П.К. Применение MSC\NASTRAN для создания модели разрушения руды в слое материала /П.К. Федотов // Перспективы развития технологии и автоматизации химических, пищевых и металлургических производств: Материалы докл. научно-практ. конф., посвященной памяти С.Б. Леонова, 28-29 апреля 2004. — Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. — С. 11—12.
9. Федотов П.К. Дезинтеграция горных пород /П.К. Федотов // Современные методы переработки минерального сырья: Материалы Общероссийской научно-практ. конф., 12—15 ноября 2003г. — Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. — С. 27—32.
10. Федотов П.К. Межчастичное разрушение руды. — М.: Геоинформмарк, 2011. — 136 с.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Федотов Павел Константинович — кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, fedotovpavel@yandex.ru

