

УДК [622.02 : 539.2/.8]: 620.174.24

Горобец Л.Ж., д-р.техн.наук, профессор,
Федоскина Е.В., магистр
 (ГВУЗ «НГУ»),
Верхоробина И.В., магистр
 (ИГТМ НАН Украины)

ЭФФЕКТЫ ДИНАМИЧНОСТИ НАГРУЖЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДРОБЛЕНИИ

Горобец Л.Ж., д-р.техн.наук, професор,
Федоскіна О.В., магістр
 (ДВНЗ «НГУ»),
Верхоробіна І.В., магістр
 (ІГТМ НАН України)

ЕФЕКТИ ДИНАМІЧНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ ГЕТЕРОГЕННОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ ДРОБЛЕННІ

Gorobets L.J., D.Sc. (Tech), Professor,
Fedoskina E.V., M.S (Tech.)
 (SHEI "NMU"),
Verhorobina I.V., M.S. (Tech.)
 (IGTM NAS of Ukraine)

EFFECTS OF DYNAMIC QUALITY OF LADENING OF GETEROGEN MATERIAL AT CRUSHING

Аннотация. Проведено изучение фактора динамичности нагружения с экспериментальной проверкой рационального режима в процессах дробления на основе применения закономерностей физики разрушения. Установлены экспериментальные показатели энергоемкости дробления при разрушении хрупких и пластичных пород. Применение метода запредельного деформирования позволило рассчитать параметры для оценки степени динамичности (или пластичности) разрушения геосред. На примере вибрационной щековой дробилки с наклонной камерой дробления реализовано применение виброударных высокочастотных режимов нагружения. Сопоставлены параметры и показатели процессов дробления и измельчения, различающихся динамичностью нагружения. Экспериментально подтверждено положительное влияние повышенной динамичности нагружения в режимах работы виброщековой дробилки и струйной мельницы.

Ключевые слова: геологическая среда, динамичность нагружения, плотность энергии, разрушение, виброщековая дробилка.

Введение. Обработка полезных ископаемых в дробилках и мельницах сопровождается значительными затратами энергии. В этой связи весьма важен поиск рациональных способов обработки гетерогенных сред, обеспечивающих выполнение технологических циклов дробления или измельчения с минимальными уровнями энергоемкости процесса и степени переизмельчения продукта.

Проблема повышения эффективности дробления-измельчения требует изучения этих процессов на теоретическом уровне, в частности, закономерностей накопления энергии к моменту разрушения.

При этом выбор параметров нагружения геоматериалов требует теоретического обоснования, поскольку скорость динамической деформации, плотность энергии при разрушении и длительность нагружения должны изменяться в зависимости от задаваемой крупности или распределений по размерам частиц дробленого (измельченного) продукта.

Варьируя режим нагружения, важно предусмотреть эффективное использование энергии разрушения, накопленной материалом на стадии нагружения.

Анализ состояния исследований в области теории и практики дробления (измельчения) [1, 2] позволяет считать, что *концентрация напряжений* в процессе нагружения материала является фактором роста эффектов *динамичности* разрушения. В режимах с повышенной концентрацией напряжений возрастает средняя плотность энергии, накопленной образцом, усиливаются эффекты дробления (измельчения), уменьшаются удельные затраты энергии на образование мелких фракций.

Анализ последних исследований и публикаций. В основе процессов дробления (измельчения) лежат элементарные акты разрушения – необратимые разрывы межатомных связей, при условии достижения критического состояния вещества в *локальных зонах*, где имеет место сильное отклонение от термодинамического равновесия. В этих зонах возникают автовозбуждения активности вещества квантово-механической природы, а разделение деформируемого тела на изолированные фрагменты (отдельности) происходит на *стадии авторезонанса* – стадии свободного разрушения, когда формирование разрывов сплошности и отдельностей происходит за счет работы диссипативных сил (без подвода энергии извне). Инициаторы актов образования новой поверхности – тепловые и автоакустические флуктуации. Согласно автоколебательной модели разрушения твердое тело с дефектами (точечными, линейными, поверхностными и объемными) разрушается волнами напряжений, порождаемых разрывными (релаксационными) автоколебаниями частиц твердого тела [3]. Образование новой поверхности происходит путем перекачки энергии кристаллической решетки в акустическую энергию в процессе разрывных автоколебаний конденсированного вещества [1].

Упругая энергия, накопленная в деформированном теле, переходит не только в потенциальную энергию γ атомов вновь образующихся свободных поверхностей. Основным вкладом в эффективную поверхностную энергию γ_s является энергия автоколебательного движения кристаллической решетки, которая в конце концов трансформируется в тепло, либо в кинетическую энергию разлетающихся осколков.

При *формализованном подходе* к оценке энергозатрат на дробление (измельчение) критическую плотность энергии при разрушении W_V (Дж/м³) можно представить двумя составляющими:

$$W_V = W_s + W_D = \gamma_s \Delta S_{y\partial} + W_D, \quad (1)$$

где $W_V = \sigma_o \varepsilon_o / 2$; σ_o , ε_o - напряжение σ_o и деформация ε_o на пределе прочности; W_D - удельная работа упругих и пластических деформаций; $W_s = \gamma_s \Delta S_{y\partial}$ - компонента критической плотности энергии, определяемая приростом $\Delta S_{y\partial}$ (м²/м³) удельной поверхности продукта; $\Delta S_{y\partial} = \Delta S / V = (S - S_o) / V$; ΔS - прирост общей площади поверхности продукта, S_o и S - площадь начальной поверхности и после разрушения образца.

Компонента $W_D V$ представляет собой затраты энергии на отделение блоков (или структурных неоднородностей) от массива (или образца), которые пропорциональны удельной работе W_D и объему V разрушаемого куска, что характеризует энергетические условия образования крупных фрагментов, то есть *режим дробления*.

Вторая компонента $\gamma_s \Delta S_{y\partial}$ представляет собой удельные затраты энергии на создание новой (ювенильной) поверхности ΔS образованных блоков, отдельных (частиц), характеризующие энергетический *режим диспергирования* материала.

Общие энергозатраты (Дж) на разрушение образца объемом V оценивают соотношением:

$$A = W_V V = \gamma_s \Delta S + W_D V \quad (2)$$

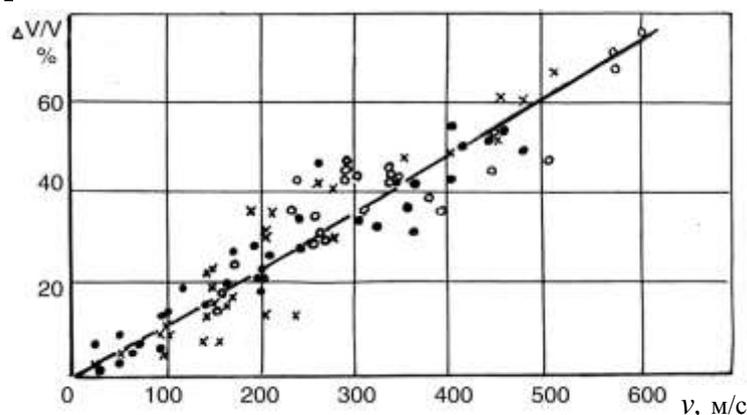
В согласии с установленной закономерностью [1] роста критической плотности W_V энергии с уменьшением размера разрушаемого образца компонента ($\gamma_s \Delta S$) сравнительно с ($W_D V$) в уравнении (2) составляет на порядок более весомый вклад в энергозатраты на дробление (измельчение).

В этой связи в практике дробления (измельчения) целесообразно соблюдать принципы рациональной организации разрушения, предложенные Л.Ф. Биленко [4]. С позиции достижения экономичности и селективности процесса дробления режимы разрушения должны включать локальное комбинированное нагружение сжатием высокоскоростными импульсами с элементами сдвига, изгиба, кручения. При нагружении должно изменяться соотношение нагрузок (сжатие, сдвиг и др.) и достигаться подвижность кусков (переориентация, удаление частиц готового продукта) между циклами нагружения.

Согласно теории при динамичном нагружении с высокой частотой \dot{N} нагружающих импульсов и высокой скоростью $\dot{\varepsilon} = v/d$ динамической деформации (v - скорость удара) в процессе дробления энергия нагружаемых кусков (частиц) изменяется скачками, что позволяет при условии соизмеримости времени накачки энергией со временем разрушения куска ускорить проявление авторезонансного механизма и усилить эффекты разрушения. Факторами, определяющими эффекты динамичности разрушения геоматериала, являются, с одной стороны,

природные свойства вещества (поверхностная энергия, прочность), а с другой – режимные параметры (скорость $\dot{\epsilon} = v / d$ деформации и длительность T нагружения).

На рис. 1 отражено влияние динамичности разрушения свободным ударом железной руды крупностью 10-14 мм в диапазоне изменения скорости удара $v = 50-600$ м/с [5].



Исходная крупность частиц d (мм): о - 14 мм; х - 12 мм; • - 10 мм

Рисунок 1 - Влияние скорости удара v на количество $\Delta V/V$ мелких фракций (менее 74 мкм) при разрушении частиц железной руды.

Многолетними исследованиями, проведенными специалистами Национального горного университета Украины [6-8], установлено, что *виброщелевая дробилка* (ВЩД) отличается от традиционных вариантов (конусная, щековая, валковая) улучшенными технологическими и уменьшенными удельными энергетическими показателями. Повышение эффективности разрушения реализуется за счет приложения ударного воздействия на материал. Согласно опытным данным дробления ферросилиция и феррохрома исходной крупностью 50 мм удельный расход электроэнергии составил 13,5 - 32 кВт·ч/т при производительности соответственно 0,6-0,24 т/ч по готовому продукту (менее 0,2 мм).

Основной принцип, реализованный в современных моделях *виброщелевых дробилок*, включает дробление материалов путем высокочастотного виброударного нагружения кусков между щеками, причем, частота воздействий на куски за время прохождения камеры дробления может регулироваться в рациональных пределах $(0,8-1,5)10^3$ мин⁻¹.

Для дробления особо прочных материалов с получением мелкозернистого продукта (доли мм) рекомендуется применение *однокамерного* варианта конструкции виброщелевой дробилки с *наклонной камерой* дробления. Например, успешно проведены испытания дробления (измельчения) материалов с широким диапазоном крепости (мел, каолин, уголь, руда, ферросплавы, твердый сплав и др.), а также переработка материалов, требующих особых технологических режимов (кабель, металлопластиковые трубы, шины и т.п.).

Положительной особенностью такой дробилки, показанной на рисунке 2, является возможность управления движением материала и его силовым нагружением. В общем виде дробилка включает *пассивную* (нижнюю) дробящую щеку

1, установленную на упругих элементах 5 и одновременно выполняющую функцию корпуса. *Активная щека* 3 установлена в стойках пассивной щеки посредством оси 2, относительно которой может совершать поворотные колебания. В заданном нейтральном положении активная щека удерживается упругими элементами 6. Колебания щёк генерируются двухвальным инерционным вибровозбудителем 2. Рабочие поверхности щёк футерованы износостойкими плитами 7.

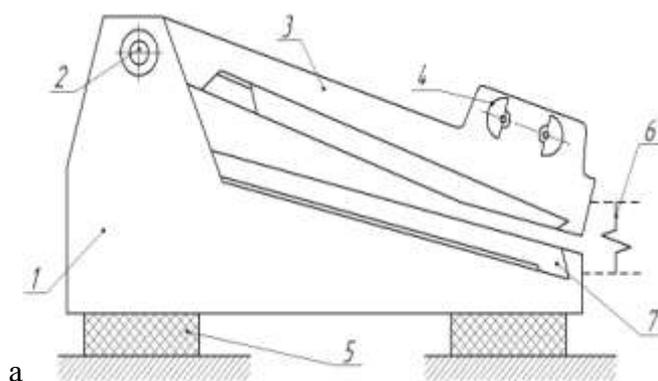


Рисунок 2 - Конструктивная схема виброщековой дробилки с наклонной камерой дробления и одной подвижной щекой

Загружаемый в дробилку материал, при перемещении к разгрузочной щели камеры дробления, подвергается силовому воздействию со стороны рабочей поверхности активной щеки, что приводит к его разрушению. Дробленый продукт проходит параллельную зону, разгрузочную щель и попадает в приемный бункер.

Перемещение материала к разгрузочной щели осуществляется за счет наклона рабочей поверхности пассивной щеки и её колебаний под действием возмущающей силы вибровозбудителя, расположенного на активной щеке. Таким образом, движение материала в щековой дробилке с наклонной камерой можно рассматривать как процесс вибрационного перемещения материала, подверженного периодическим ударам. Перемещение может происходить между сужающимися или параллельными плоскостями. Нижняя плоскость (пассивная щека) обеспечивает транспортирование материала. Верхняя плоскость (активная щека) обеспечивает нанесение периодических ударов.

Изучение кинетики взаимодействия куска с активной щекой проводилось с применением скоростной кинокамеры. В начальном положении кусок материала в *зоне дробления* занимает устойчивое положение на пассивной щеке, так как находится в зажатом положении: зазор между поверхностями щёк и куском отсутствует.

На рис. 3 показано состояние кусков материала в *зоне дробления*. Кусок, зажатый между щеками, имеет нулевую скорость до появления зазора с рабочей поверхностью *активной щеки*. Такой зазор образуется в результате разрушения куска или от движения *активной щеки* в направлении холостого

хода. При появлении зазора кусок будет перемещаться к разгрузочному окну до следующего силового воздействия между щеками.



Рисунок 3 - Состояние кусков материала в зоне дробления

Эти особенности конструктивной схемы вибрационной щековой дробилки с наклонной камерой дробления создают возможность варьировать параметрами нагружения материала в широких пределах, а также управлять процессом дробления за счёт применения динамических режимов силового нагружения и регулирования скорости движения материала [9]. Установлено, что критерием эффективной работы служит коэффициент $\lambda = P/\omega$, характеризующий динамические свойства дробилки как отношение собственных P и вынужденных ω колебаний активной щеки: $\lambda = 0,4-0,7$.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья.

Согласно *кинетической концепции прочности* разрушение нагруженных геоматериалов является многостадийным процессом зарождения и роста трещин от момента приложения нагрузки до макроразрушения. Процесс разрушения на разных масштабных уровнях развивается в нагружаемом твердом теле в активных локальных зонах по достижении в них критического состояния вещества. *Динамические эффекты* разрушения формируются в зависимости от уровня энергетического воздействия, в частности, от скорости и частоты нагружающих импульсов изменяется критическая плотность W_V энергии при разрушении образца.

Для изучения факторов, влияющих на эффекты динамичности нагружения геосред, проведем теоретический анализ закономерностей их разрушения с применением метода запредельного деформирования на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия (УНТС) [10, 11]. Пример полной диаграммы $\sigma - \varepsilon$ деформирования угля показан на рис. 4, где отмечены ведущие характеристики диаграммы: предел прочности σ_0 , остаточная прочность σ^* , а также деформации ε_0 и ε^* перехода к разупрочнению и далее – к состоянию остаточной прочности.

Запредельная стадия диаграммы начинается с релаксации напряжений после достижения максимальной прочности (σ_0), затем наблюдается область

(вертикальный участок графика) интенсивного разрушения ($\sigma_o - \sigma_i^*$) - стадия быстрой разгрузки напряжений (с максимальным модулем спада графика), сопровождающаяся увеличением деформации, разрыхлением структуры с образованием тонкодисперсных частиц (стадия диспергирования). Эффекты объемного нагружения (σ_1 – параллельно напластованию) образца угля и разрушения его на пределе прочности $\sigma = 50$ МПа (коэффициент концентрации напряжений $K = 2$) иллюстрируются на рис. 5. Видно, что разрушение угольного образца произошло в результате сдвиговой пластической деформации.

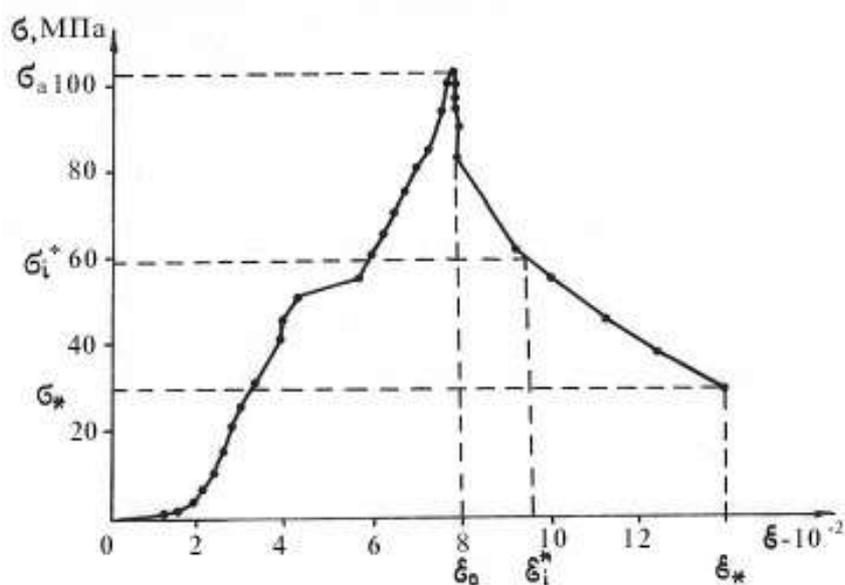


Рисунок 4 - Диаграмма деформирования угля трехосным неравнокомпонентным сжатием

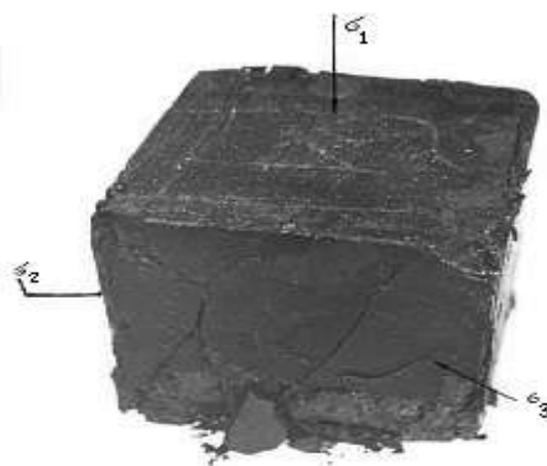


Рисунок 5 - Образец угля в результате нагружения трехосным неравнокомпонентным сжатием

Наклонные трещины в образце угля, ориентированные под углом 30-40° к σ_2 , свидетельствуют о действии касательных напряжений в условиях

обобщенного сдвига, а наличие трещин вдоль оси сжатия σ_I подтверждает действие нормальных напряжений.

Информация о запредельном поведении геоматериалов дает возможность для оценки общего удельного расхода энергии Γ (Дж/м²) на дробление (измельчение) по соотношению, включающему все статьи затрат энергии: полезную работу $W_i V_i$ диспергирования с компонентой $W_o V_o$ действия упругих напряжений и работой $W_{nl} V_{nl}$ пластического деформирования:

$$\Gamma = \frac{W_o V_o + W_i V_i + W_{nl} V_{nl}}{\Delta S} = \frac{W_o \varepsilon_o + W_i \varepsilon_i + W_{nl} \varepsilon_{nl}}{\Delta S / V}. \quad (3)$$

Здесь V_o , V_i , V_{nl} - объемы зон действия соответственно упругих, разрушающих (диспергирующих) и перемещающих (сдвиговых) напряжений; $V_o = \varepsilon_o V$; $V_{nl} = \varepsilon_{nl} V$, $V_i = \varepsilon_i V$; σ_{nl} , ε_{nl} - изменение напряжений и деформаций на стадии пластической разгрузки; $\sigma_{nl} = \sigma_i^* - \sigma^*$; $\varepsilon_{nl} = \varepsilon^* - \varepsilon_i^*$; $W_{nl} = \sigma_{nl} \varepsilon_{nl} / 2$; $W_o = \sigma_o \varepsilon_o / 2$; $W_i = \sigma_i \varepsilon_i / 2$.

При одноосном сжатии из-за отсутствия сведений о запредельном состоянии производим оценку удельного расхода энергии на дробление (измельчение) по формуле:

$$\Gamma = \frac{W_o V_o}{\Delta S} = \frac{W_o \varepsilon_o}{\Delta S / V}. \quad (4)$$

В таблицу 1 сведены показатели, характеризующие эффекты деформирования и разрушения, дробления и диспергирования при различных режимах на-гружения модельных образцов угля: ООС – одноосное сжатие, ТОС - трехосное неравнокомпонентное сжатие с изменением величины K концентратора напряжений (соотношение максимального и минимального напряжений $K = 2; 5$). Объем разрушаемых образцов составлял 175 см³.

Таблица 1 - Влияние условий нагружения на показатели разрушения угля сжатием

№	Вид нагружения	σ_o , Па	ε_o , %	W_o , МДж/м ³	$W_{\Delta V}$, МДж/м ³	β (%) фракции (мкм) менее		$\Delta S/V$, м ² /м ³	Γ , Дж/м ²
						200	500		
1	ООС	11	3,6	0,2	-	2,7	5,5	1970	102,0
2	ТНС, $K = 2$	50	2,4	0,6	25,0	0,9	1,7	342	137,0
3	ТНС, $K = 2$	40	1,7	0,34	13,0	1,9	2,3	427	39,5
4	ТНС, $K = 5$	104	7,7	4,0	210,0	8,2	10,2	7690	45,0
5	ТНС, $K = 5$	63	3,4	1,1	46,5	4,8	11,3	955	90,0

Как следует из опытных данных, режимы с повышенной концентрацией напряжений ($K = 5$) обеспечивают рост уровня средней плотности W_o в разрушаемом материале, деформации ε_o и свежесформированной поверхности $\Delta S/V$, при

этом уменьшаются энергозатраты Γ (Дж/м²). Таким образом, с позиций дробимости и (измельчаемости) энергетически выгоден режим неравнокомпонентного объемного нагружения: по сравнению с одноосным сжатием можно увеличить в 2-3 раза количество β мелких фракций (-200; -500 мкм), а прирост поверхности $\Delta S/V$ - в 3,5-4 раза.

Цель работы состоит в установлении параметров для оценки динамичности нагружения, их связи с эффектами и энергоемкостью дробления. При этом практически важно обосновать рациональные способы и уровни энергетических параметров нагружения с учетом особенностей механизма хрупкого или пластичного разрушения геоматериалов.

Основной материал исследования. *Динамическую стадию* разрушения (саморазрушение, свободное разрушение) с эффектами дробления и диспергирования характеризует запредельная часть диаграммы $\sigma(\varepsilon)$, а именно, степень динамичности пропорциональна модулю спада запредельного участка (от σ_0, ε_0 до $\sigma_i^*, \varepsilon_i^*$) разгрузки напряжений. Чем круче модуль спада запредельного участка разгрузки напряжений (от σ_0, ε_0 до $\sigma_i^*, \varepsilon_i^*$), тем ближе механизм разрушения к хрупкому (удароопасному, выбросоопасному) варианту. На рис. 6 приведены диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ в режиме трехосного неравнокомпонентного сжатия песчаника выбросоопасного (ВО) (1) и невыбросоопасного (НВО) (2).

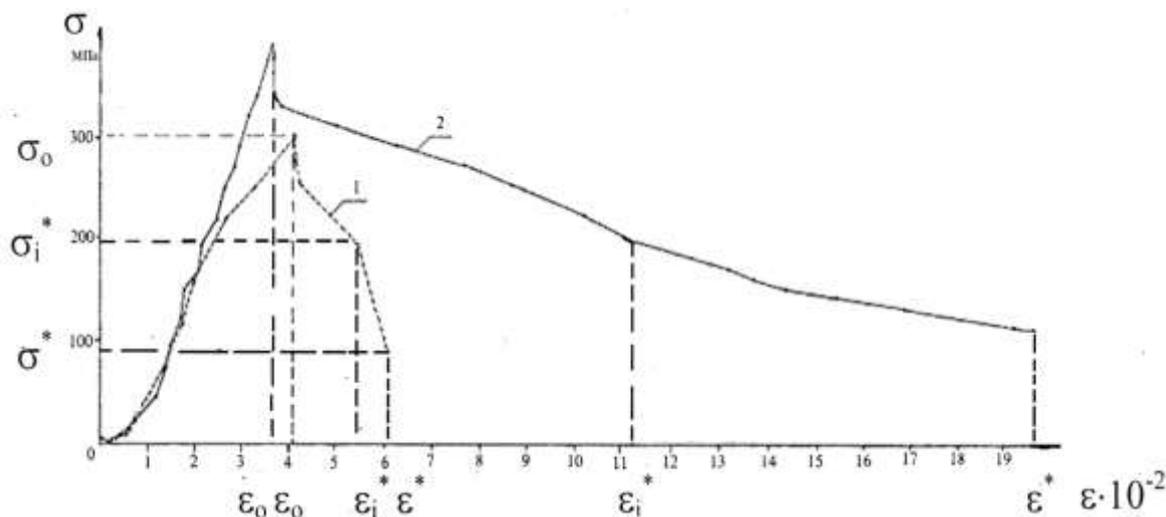


Рисунок 6 - Диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ в режиме трехосного неравнокомпонентного сжатия песчаника выбросоопасного (ВО) (1) и невыбросоопасного (НВО) (2)

Как видно, у квазипластичных материалов (песчаник НВО) за стадией саморазрушения (вертикальным участком графика) следует отчетливо выраженная стадия пластического деформирования (с малым модулем спада) обусловленная сдвигом, трансляцией и ротацией обломков и отдельностей, которая завершается состоянием остаточной прочности (σ^*, ε^*). Для природных сред с хрупким механизмом разрушения (песчаник ВО) запредельный участок пластического деформирования на диаграмме $\sigma(\varepsilon)$ может практически отсутствовать (см. график 1 рис. 2).

Существенные отличия геосред в запредельных параметрах нагружения дают основание для оценки их склонности к *динамичному или пластичному* механизму разрушения с променением следующих характеристик плотности энергии. Энергетика разрушения характеризуется средней W_V и локальной $W_{\Delta V}$ плотностью энергии, в частности, величина $W_V = \sigma_o \varepsilon_o / 2$ - это энергия, приданная телу в процессе нагружения и приходящаяся на единицу его объема, а $W_{\Delta V} = W_V / \varepsilon_{\Delta}$ - локальная плотность энергии на единицу объема очага разрушения (ε_{Δ} - относительная деформация трещинообразования – диспергирования).

Склонность породы к *динамичному* (хрупкому) или длительному (пластичному) разрушению можно оценить коэффициентами диспергируемости K_D и пластичности K_{nl} согласно соотношениям компонент плотности энергии на стадиях допредельного (W_o) и запредельного (W_i, W_{nl}) деформирования [1]:

$$K_D = \frac{W_o + W_i}{W_o}; \quad K_{nl} = \frac{W_o + W_{nl}}{W_o}, \quad (5)$$

где W_o, W_i, W_{nl} - компоненты плотности энергии соответственно в зонах действия упругих напряжений W_o , диспергирования W_i и пластического деформирования W_{nl} ($W_o = \sigma_o \varepsilon_o / 2$; $W_i = \sigma_i \varepsilon_i / 2$; $W_{nl} = \sigma_{nl} \varepsilon_{nl} / 2$).

Эксперименты показали, что порода с динамичным (хрупким) механизмом разрушения релаксирует накопленную энергию преимущественно в результате перепада напряжений $\sigma_i = \sigma_o - \sigma_i^*$ на стадии диспергирования, тогда как порода с преобладающим пластичным разрушением (песчаник невыбросоопасный - НВО) – за счет преимущественного роста деформации $\varepsilon_{nl} = \varepsilon^* - \varepsilon_i^*$ на стадии дробления, предшествующей состоянию остаточной прочности (σ^*).

Как установлено, по хрупкому механизму разрушается выбросоопасный песчаник (ВО), ($K_{nl}=1,0$; $K_D=1,32$), тогда как тальку и песчанику невыбросоопасному (НВО) присуща более высокая пластичность разрушения ($K_{nl} = 1,27$ для талька, $K_{nl} = 1,49$ для песчаника НВО). Согласно испытаниям деформация образца НВО песчаника на стадии разгрузки напряжений превышает более, чем в 3 раза аналогичную величину для ВО песчаника [1].

В таблице 2 приведены показатели процессов дробления и измельчения, различающихся динамичностью нагружения материалов в виброщечковой дробилке и шаровой барабанной мельнице (НГУ), щековой дробилке и конусной инерционной (НПО «Механобр»), противоточной воздушоструйной мельнице (ВГМК).

Полученные экспериментальные данные дробления кусков ферроматериалов в виброщечковой дробилке и воздушоструйного измельчения в условиях НГУ и Вольногорского горно-металлургического комбината (редкометалльные концентраты) показали положительное влияние фактора повышенной динамичности нагружения как в режиме дробления – вибрационным сжатием крупных отдельностей, так и в режиме измельчения – свободными высокоскоростными соударениями частиц, ускоренных струями до сотен метров в секунду. Для обоих видов технологий на один-два порядка

повышается *условная технологическая* эффективность $E = G \cdot i$ процесса, оцениваемая произведением степени i измельчения на производительность G по готовому продукту.

Таблица 2 – Параметры и показатели процессов дробления и измельчения, различающихся динамичностью нагружения

Параметры	Измельчение		Дробление		
	воздухоструйное	шаровое	виброщековая дробилка ВЩД-220	щековая дробилка ДЩ60x100	Конусная инерционная дробилка КИД-100
Режим нагружения	свободные удары частиц (100-300 м/с)	стесненные удары шаров (до 10 м/с)	вибрационное сжатие	одноосное сжатие	сжатие
Вид материала	цирконовый концентрат	феррохром	ферросилиций, феррохром	геосреды	геосреды
Крупность, D , мм	0,16	50	50	50	10
d , мм	0,02	0,2	0,2	1,0	0,3
Производительность G , т/ч	1,4-1,1	0,06	0,24-0,6	0,03	0,03
Степень i измельчения	80	66,5	66,5	50	33,3
Удельный расход электроэнергии W , кВт·ч/т	201,3-250,4	55	32-13,5	36,7	50
W , МДж/м ³ ($\rho = 3$ т/м ³)	2174-2704	594	345,6-145,8	396	540
Эффективность процесса $E = G \cdot i$	112-91	4	40-16	1,5	1

Следует отметить более рациональную организацию динамики и кинетики разрушения в виброщековой дробилке (с учетом *принципа* Л.Ф. Биленко), что позволило в 1,5-3 раза уменьшить величину W удельных энергозатрат в технологии мелкого дробления по сравнению со стандартными способами дробления в щековой и конусной инерционной дробилками.

Выводы.

1. В технологиях дробления - измельчения концентрация напряжений в нагружаемой геосреде служит фактором уменьшения удельных энергозатрат. Расчет параметров K_d и K_{nl} с применением метода запредельного деформирования позволяет экспериментально оценить степень *динамичности* (или пластичности) разрушения геосред.

2. Динамичность разрушения геоматериалов усиливается в режимах нагружения с повышенной частотой и скоростью динамической деформации, при этом в технологии дробления (измельчения) *квазихрупких* материалов энергетически выгодны режимы объемного нагружения, для *квазипластичных* – одноосного нагружения.

3. Проведенные теоретический анализ и экспериментальные исследования подтверждают целесообразность использования *вибрационной щековой дробилки с наклонной камерой дробления* в качестве самостоятельного измельчительного агрегата (крупность продукта – доли мм). При этом эффективность рабочего процесса, реализующего виброударные высокочастотные ($\approx 10^3$ мин⁻¹) режимы нагружения, превышает на порядок аналогичные показатели для менее энергонапряженных дробилок и мельниц (щековая, конусная инерционная, шаровая барабанная).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горобец, Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: автореф. дис... д-ра техн. наук / Л.Ж. Горобец. – Днепропетровск: НГУ, 2004. - 35 с.
2. Бовенко, В.Н. Синергетические эффекты и закономерности релаксационных колебаний в состоянии предразрушения твердого тела: автореф. дис... д-ра физ.-мат. наук / В.Н. Бовенко. - М.:1990.-30 с.
3. Горобец, Л.Ж. Определение зависимости плотности энергии от размера разрушения Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко // ФТПРПИ. -1986. - № 5. – С. 109-111.
4. Биленко, Л.Ф. Особенности приготовления известняково-нефелиновой шихты глиноземного производства – С-Пб: 1993. – 189 с.
5. Горобец, Л.Ж. Об эффективности высокодинамичной обработки материалов при тонком измельчении / Л.Ж. Горобец, И.А. Шуляк, И.В. Верхоробина // Вибрации в технике и технологиях / НГУ – Днепропетровск, 2004. - № 1 (33). – С. 36-39.
6. Федоскина, Е.В. Об оценке производительности вибрационной щековой дробилки / Е.В. Федоскина // Обогащение полезных ископаемых: Научн.-техн. сб. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 20 (61). - С.34-38.
7. Пат. № 32607 Україна, МПК В02С 1/00. Вібраційна щокова дробарка / В.П. Франчук, О.В. Федоскіна; заявник та патентовласник НГУ. - № а200714974 ; заявл. 28.12.07; опубл. 26.05.08, Бюл. № 10.
8. Пат. № 89439 Україна, МПК В02С 1/00. Вібраційна щокова дробарка / В.П. Франчук, О.В. Федоскіна; заявник та патентообладатель НГУ. - № а200805565 ; заявл. 29.04.08; опубл. 25.01.10, Бюл. № 2.
9. Плахотник, В.В. Динамика дробилки в режиме виброударного дробления / В.В. Плахотник, Е.В. Федоскина // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – Вып. 85. - С. 88 - 93.
10. Верхоробина, И.В. Новый метод исследования процесса измельчения / И.В. Верхоробина, Л.Ж. Горобец // Теорія і практика процесів подрібнення, розділення, змішування і ущільнення: Зб. наук. праць / ОНМА. – Одеса, 2003. - Вып. 10. - С. 29-33.
11. Горобец, Л.Ж. Принципы и показатели функционирования геосреды при нагружении / Л.Ж. Горобец, И.В. Верхоробина // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. трудов / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2016. – Вып. 129. - С.122-135.

REFERENCES

1. Gorobets, L.Zh. (2004), «Development of scientific foundation for the solid minerals grinding», Abstract of Ph.D. dissertation, Mineral dressing, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Bovenko, V.N. (1990), «The synergetics effects and conformities to law of relaxation vibrations in a state of pre-destruction of solid», Abstract of Ph.D. dissertation, Phis.- Math., Institute MIEM, Moscow, SU.
3. Gorobets, L.Zh. and Bovenko, V.N. (1986), “Determination of energy closeness dependence from the size of destruction”, *FTPRPI*, no 5, pp. 109-111.
4. Bilenko, L.F. (1993), *Osobennosti prigotovleniya izvestnyakovo-nefelinovoy shikhty glinozemnogo proizvodstva* [Features of preparation aluminous production limestone-nephelinite charge], S-Pb, RU.
5. Gorobets, L.Zh., Shulyak, I.A. and Verhorobina, I.V. (2004), “About efficiency of high-dynamic treatment of materials at micronizing”, *Vibration in a technique and technologies*, no 1 (33), pp. 36-39.
6. Fedoskina, Ye.V. (2004), “About the estimation of the productivity of oscillation cheek crusher”, *Enriching of minerals*, no. 20 (61), pp. 34-38.

7. Franchuk, V.P. and Fedoskina, O.V., Zayavnyk ta patentovlasnyk NGU (2008), *Vibratsiyna shchokova drobarka* [Oscillation cheek crusher], Dnipropetrovsk, UA, Pat. 32607.
8. Franchuk, V.P. and Fedoskina, O.V., Zayavnyk ta patentovlasnyk NGU (2010), *Vibratsiyna shchokova drobarka* [Oscillation cheek crusher], Dnipropetrjvsk, UA, Pat. 89439.
9. Plahotnik, V.V. and Fedoskina E.V. (2008), “Dynamics of crusher in the mode of the vibroshock crushing”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 85, pp. 88 - 93.
10. Verhorobina, I.V and Gorobets, L.Zh. (2003), “New method of grinding process research”, *Theory and practice of processes of grinding*, National Marine Academy, Odessa, UA, no 10, pp. 29-33.
11. Gorobets, L.Zh. and Verhorobina, I.V. (2016) “Principles and indexes of functioning of geological environment at a ladening”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 129, pp.122-135.

Об авторах

Горобець Лариса Жановна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри обогачення корисних копалин, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ НГУ), Днепр, Україна, larisa-gorobets-@rambler.ru

Федоскіна Елена Валерьевна, магістр, асистент кафедри основ конструювання машин і механізмів, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ НГУ), Днепр, Україна, fedoskina.ev@gmail.com

Верхоробина Інна Владимировна, магістр, ведучий інженер в відділі геодинамічних систем і вібраційних технологій, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Днепр, Україна, inna_kuchuk@ukr.net

About the authors

Gorobets Larisa Zhanovna, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Professor, Professor of Minerals Enriching Department, State Higher Educational Institution «National Mining University» (SHEI “NMU”), Dnepr, Ukraine, larisa-gorobets@rambler.ru.

Fedoskina Elena Valeryevna, Master of Sciences, Assistant in the Department of the Fundamentals of Designing Machines and Mechanisms, State Higher Educational Institution «National Mining University» (SHEI “NMU”), Dnepr, Ukraine, fedoskina.ev@gmail.com

Verkhorobina Inna Vladimirovna, Master of Sciences, Principal Engineer in the Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, inna_kuchuk@ukr.net.

Анотація. Проведено вивчення чинника динамічності навантаження з експериментальною перевіркою раціонального режиму в процесах дроблення на основі застосування закономірностей фізики руйнування. Встановлені експериментальні показники енергоємності дроблення при руйнуванні крихких і пластичних порід. Застосування методу позамежної деформації дозволило розрахувати параметри для оцінки міри динамічності (чи пластичності) руйнування геосередовищ. На прикладі вібраційної щічної дробарки з похилою камерою дроблення реалізовано застосування віброударних високочастотних режимів навантаження. Зіставлені параметри і показники процесів дроблення і подрібнення, що розрізняються динамічністю навантаження. Експериментально підтверджений позитивний вплив підвищеної динамічності навантаження в режимах роботи віброщічної дробарки і струминного млина.

Ключові слова: геологічне середовище, динамічність навантаження, щільність енергії, руйнування, віброщічна дробарка.

Annotation. The study of factor of dynamic quality of loading with experimental verification of the rational mode in the processes of crushing on the basis of application regular physics of destruction is conducted. The experimental indexes of energy capacity of crushing at destruction of fragile and plastic breeds are set. Application of method of behind-limit deformation allowed to expect parameters for estimation degree of dynamic quality (or plasticity) of destruction of geomedium. On the example of vibration cheek crusher with inclined chamber of crushing application of the vibro-percussive high-frequency modes of loading is realized. Parameters and

indexes of processes of crushing and growing shallow, differentiating by dynamic quality of loading, are confronted. The positive influencing of the promoted dynamic quality of loading in the modes of operations of vybro-cheek cruster and stream mill is experimentally confirmed.

Keywords: geological environment, dynamic quality of loading, closeness of energy, destruction, vybro-cheek crusher.

Статья поступила в редакцию 25.11.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.П. Надутым