

УДК 622.724; 622.76

К ВОПРОСУ О ТЕХНОГЕННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ АЛМАЗОВ**¹Монастырский В.Ф.**¹*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины***ДО ПИТАННЯ ПРО ТЕХНОГЕННУ УШКОДЖЕНІСТЬ АЛМАЗІВ****¹Монастирський В.Ф.**¹*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України***ON THE ISSUE OF MAN-CAUSED DAMAGEABILITY OF DIAMOND****¹Monastyrsky V.F.**¹*Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine*

Аннотация. В настоящей статье представлены результаты научных и практических работ по исследованию процессов повреждаемости алмазов при переработке алмазосодержащего сырья в переделе рудоподготовки. Рассмотрены вопросы повреждаемости алмазов при взрыве, дроблении в дробилках и прессах, измельчении в ММС и транспортировании алмазосодержащих руд ленточными конвейерами и гидравлическим транспортом. Установлено, что сохранность алмазов повышается при применении оптимальных параметров технологических операций. При этом технология ведения взрывных работ предусматривает регулирование энергетического воздействия на забой так, чтобы кимберлит подвергался разрушению раньше, чем взрывная волна достигнет кристалла алмаза и он не успеет воспринять её воздействие из-за объёмного сжатия окружающими породами. В технологических операциях дробления происходит объёмное сжатие кимберлитов и свободных алмазов, регулирование которого должно обеспечиваться устройствами с контролем предельного усилия сжатия. При измельчении алмазосодержащего сырья в ММС повреждаемость алмазов находится в прямой зависимости от режимов её работы. Оптимальным режимом является каскадный, при котором повреждаемость алмазов уменьшается в 1,5-2 раза. При транспортировании алмазосодержащего сырья ленточными конвейерами или гидравлическим транспортом значимым фактором является энергия взаимодействия алмаза с элементами конвейера или отводом гидравлического насоса. При этом вероятность повреждения алмазов в пункте загрузки конвейера в 3 раза меньше, чем в гидравлическом насосе. Рекомендовано применять скважинные заряды с воздушным промежутком и ЭВВ «Иремекс»; пресса для дробления с системой предельного сжатия, при которой реальные напряжения в алмазе не превосходят допустимых; оптимальную частоту вращения барабана ММС: $(0,60 \div 0,65) n_{кр}$ для ММС $9,0 \times 2,8$; $0,50 n_{кр}$ для TGL $5,0 \times 2,3$; ленточные конвейеры, оборудованные в пункте загрузки роlikоопорами с амортизаторами.

Ключевые слова: повреждаемость алмаза, технологическая операция, взрыв, параметры, режим, пресс, дробилка, мельница, конвейер, насос, энергия, напряжения, вероятность.

Введение. В настоящее время в мире за год добывается 23 т природных алмазов. Алмаз является важнейшим валютным и стратегическим товаром. Масштабами применения алмазного сырья в промышленности оценивается экономический потенциал развитых стран.

Актуальность. Извлекаемые из недр Земли алмазы представляют весьма разнообразный как по крупности, так и по качеству материал. Различают два вида алмазного сырья: алмазы ювелирные и алмазы технические. К ювелирным алмазам относятся камни совершенной формы, окраски, исключительной прозрачности, без трещин и включений. Согласно современным научным представлениям кристаллическая решётка алмаза относится к кубической системе, которая характеризует твёрдые тела высокой прочности и твёрдости. Однако твёрдость алмаза разная в различных кристаллографических направлениях и его анизотропия проявляется при динамическом нагружении. Способность минералов

раскалываться при ударе по определённым направлениям с образованием плоской зеркальной поверхности называется спайностью. Алмаз обладает совершенной спайностью по октаэдру, что обуславливает его хрупкость и возможное разрушение под действием возникающих нагрузок во время технологических операций.

Известно [1-6], что повреждаемость кристаллов алмаза происходит при ведении взрывных работ, дроблении и измельчении в щековых, конусных, валковых дробилках, в прессах объёмного сжатия, мельницах мокрого самоизмельчения и при транспортировании конвейерами или гидравлическим транспортом. Исследования [4-7] показали, что техногенная повреждаемость алмазов при добыче и переработке алмазосодержащих руд приводит к потере их массы в среднем 10-12 %. При этом, в силу законов разрушения хрупких тел в зависимости от их размеров, потеря массы алмазов крупнее 10 мм составляет 2-25 %, а потеря массы для алмазов размером 1-2 мм не характерна. Повышенная повреждаемость в сочетании с высоким содержанием крупных алмазов приводит к значительным стоимостным потерям, снижение которых является важной народно-хозяйственной задачей.

Результаты исследований. В данной работе проанализирована совокупность указанных выше технологических операций с целью выявления наиболее значимых факторов, влияющих на повреждаемость алмазов. В [2, 3, 6, 8] экспериментально исследована техногенная повреждаемость кристаллов алмаза при взрывной отбойке руды от массива. Установлено, что на сохранность алмазов существенное влияние оказывают параметры буровзрывных работ, тип ВВ, энергия массового взрыва. По энергетическому воздействию взрыва на массив различают технологии щадящую и в зажатой среде. Щадящая технология ведётся при пониженных энергетических показателях, что позволяет снизить повреждаемость алмазов, но при этом повышается выход негабарита, снижается эффективность экскавации руды и её погрузки на транспортные средства. При применении технологии взрывных работ в зажатой среде увеличивают энергетическое воздействие на массив, так что кимберлит подвергается разрушению раньше, чем взрывная волна достигнет кристалла алмаза и из-за объёмного сжатия окружающими породами повреждаемость алмазов снижается. Однако при этом технология ведения буровзрывных работ становится более дорогостоящей. Институтом Якутнипроалмаз предложена технология буровзрывных работ, включающая применение скважинных зарядов с воздушным промежутком и ЭВВ «Иремекс» в качестве основной (нижней) части скважинного заряда [5, 6]. Рекомендовано и экспериментально подтверждено, что формирование скважинных зарядов с воздушным промежутком на блоках кимберлитов обеспечивает более равномерное рассредоточение энергии взрыва по всей длине скважины с сокращением потерь ценности алмазов (до 8,7 % исходной стоимости) и оптимизирует гранулометрический состав разрыхлённых взрывом кимберлитов.

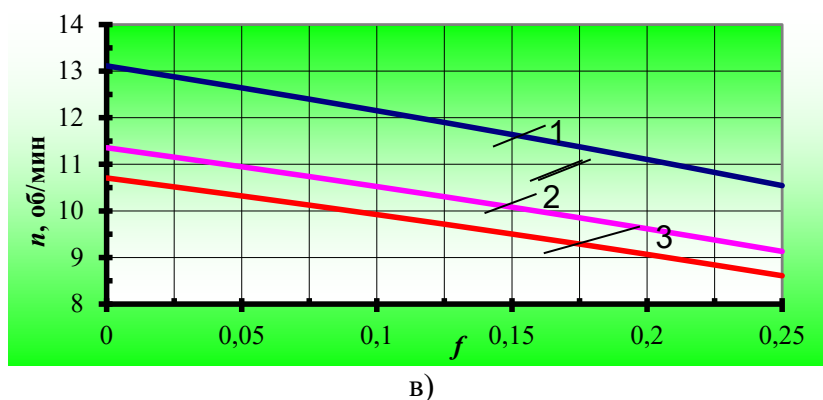
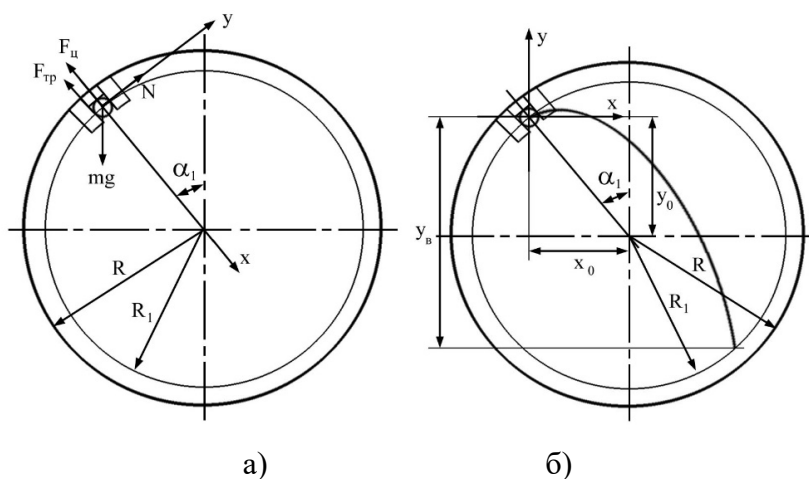
В последующих технологических операциях додрабливания или измельчения в дробилках и в прессах происходят процессы, аналогичные дроблению взрывом со скоротечным воздействием на отдельно взятые крупные куски, сво-

бодные или вкрапленные на одном из выступов куска алмазы. Дробление крупных кусков руды осуществляется в зажатой среде под действием сил сжатия. Алмазы, находящиеся внутри кусков, не испытывают ударных нагрузок и их повреждаемость практически не возникает, однако возможно нарушение природного качества свободных или вкрапленных на выступах алмазов [4, 5]. В [5] установлено, что технология додробливания в валковых прессах с системой регулирования предельного усилия сжатия позволяет уменьшить количество повреждённых кристаллов и снизить потерю массы алмазов в 3 раза.

На предприятиях АК «АЛРОСА» после дробления в дробилках алмазосодержащее сырье поступает в мельницы мокрого самоизмельчения (ММС) с диаметром барабана 5; 7; 9; 10,5 м конструкции иностранных фирм («Сведала», «Роксайд») и Сызранского завода. Согласно исследованиям института Якутнипроалмаз процесс рудоподготовки в мельницах самоизмельчения можно рассматривать как многостадийное дробление (крупное, среднее, мелкое). Кроме того, измельчение зависит от частоты вращения барабана и режимов их работы. Установлена рациональная частота вращения барабана ММС $n_6 = 0,75n_{кр}$ ($n_{кр}$ – критическая частота вращения барабана), рекомендуемая для эксплуатации мельниц предприятий АК «АЛРОСА».

Задача оптимизации частоты вращения барабана исследовалась в [7] с учётом удельного расхода электроэнергии на измельчение и средневзвешенного диаметра зёрен измельчённой руды на выходе.

Постановка задачи сформулирована следующим образом: барабан ММС в виде пустотелого цилиндра радиуса R , футерованного изнутри специальными блоками толщиной δ , вращается с постоянной угловой скоростью ω ; крупнокусковая фракция материала загружается в нижнюю часть барабана; режимы движения материала



а) силы, действующие на материал; б) траектория движения куска; в) зависимости оптимальной частоты вращения от коэффициента трения в проточной среде: 1, 2, 3 – соответственно для барабанов $D = 7$ м; $D = 9$ м; $D = 10,5$ м

Рисунок 1 – Прилифтерный режим работы ММС

внутри мельницы: прилифтовый (рис. 1), водопадный (рис. 2) и каскадный (рис. 3). Каждый из указанных режимов ограничивается определённой зоной (прилифтовый – α_1 , водопадный – α_2 , каскадный – α_3), обусловлен внешними силами (центробежной силой $F_{\text{ц}}$, силой трения $F_{\text{тр}}$, силой тяжести mg , силой реакции опоры N) и траекториями движения отдельных фракций загружаемого материала (круговой, параболической и прямолинейной).

Для прилифтового режима

приняты следующие допущения: размер куса материала не превышает расстояния между лифтами; кусок движется по круговой траектории радиуса R_1 до тех пор, пока тангенциальная составляющая силы тяжести куса не превысит центробежную силу и силу трения; система координат находится в центре куса.

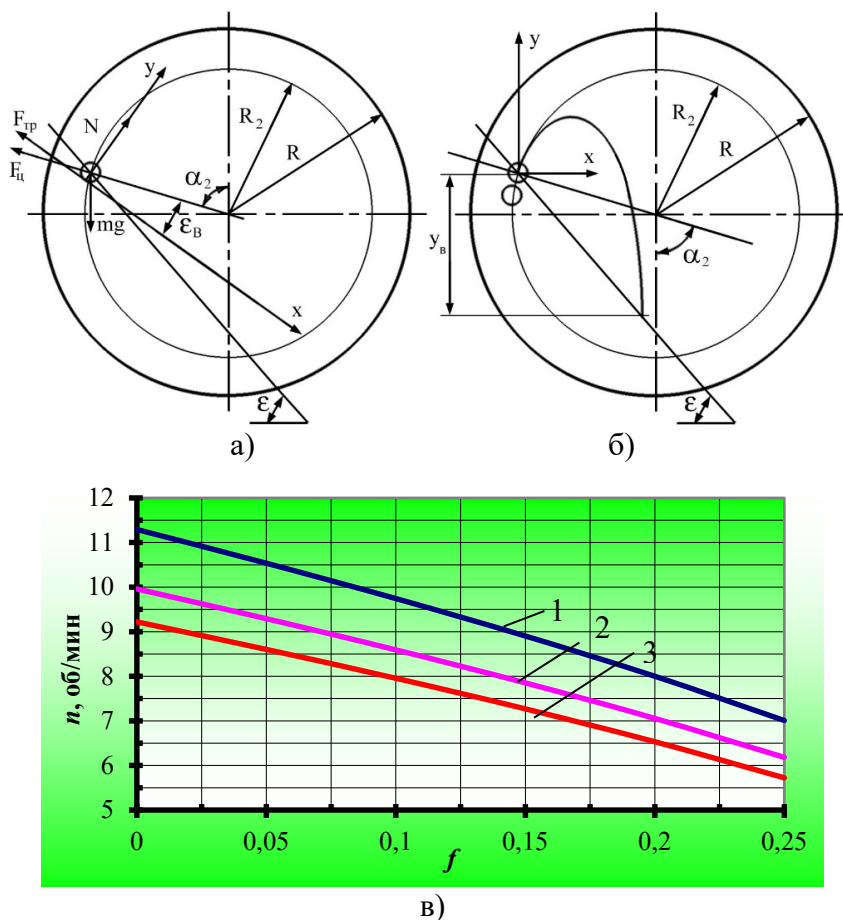
На рис. 1,а,б представлены расчётная схема и траектория движения куса, согласно которым для определения оптимальной скорости вращения барабана получены следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum F_i x_i = -F_{\text{ц}} + mg \cdot \cos \alpha_1 - F_{\text{тр}} = 0; \\ \sum F_i y_i = N - mg \cdot \sin \alpha_1; \\ \begin{cases} y^2 - 2yR_1 \cos \alpha_1 - 2xR_1 \sin \alpha_1 + x^2 = 0; \\ y = x \operatorname{tg} \alpha_1 - \frac{gx^2}{2R_1^2 \cos^2 \alpha_1}, \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

где f – коэффициент трения в проточной среде; m – масса куса.

Решение систем уравнений (1) имеет вид соответственно:

$$\omega = \sqrt{\frac{g(\cos \alpha_1 - f \sin \alpha_1)}{R_1}}; \quad y_{\text{в}} = -4R_1 \sin^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_1. \quad (2)$$



а) силы, действующие на материал; б) траектория движения куса; в) зависимости оптимальной частоты вращения от коэффициента трения в проточной среде: 1, 2, 3 соответственно для барабана $D = 7$ м; $D = 9$ м; $D = 10,5$ м

Рисунок 2 – Водопадный режим работы ММС

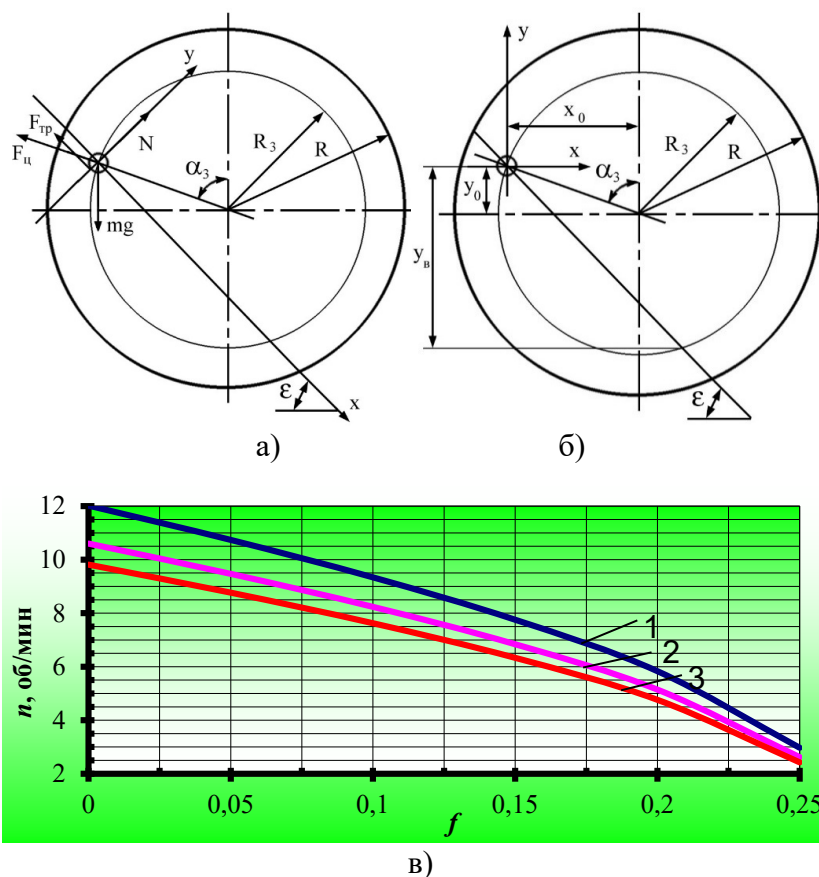
Для определения оптимального значения угла α_1 находили точку встречи траектории движения куска с круговой траекторией мельницы радиуса R_1 (см. рис. 1,б) и исследовали выражение y_B (2) на экстремум. В производную подставлялись значения исходных данных, определялись корни уравнения при условии равенства её нулю, значение оптимального угла $\alpha_1 = 57,74^\circ$ и оптимальная скорость вращения барабана ω (2).

На рис. 1,в представлены зависимости оптимальной частоты вращения барабана от коэффициента трения при прилифтёрном режиме.

Анализ полученных результатов показал, что при коэффициенте трения в проточной среде $f \leq 0,1$ оптимальная частота вращения барабана составляет $12,0 \text{ мин}^{-1}$ для ММС $D = 7 \text{ м}$; $11,0 \text{ мин}^{-1}$ для ММС $D = 9 \text{ м}$; $10,0 \text{ мин}^{-1}$ для ММС $D = 10,5 \text{ м}$ и снижается в 1,2 раза при увеличении диаметра барабана с 7 до 10,5 м.

При водопадном режиме работы ММС крупные куски располагаются в материале, имеющем угол наклона ε_B относительно линии действия центробежной силы, и на расстоянии $R_2 = 0,9R_1$ от центра барабана. Значение угла ε_B определяется из выражения $\varepsilon_B = \varepsilon + \alpha_2 - 90$ (см. рис. 2,а). При определении оптимального угла α_2 считали, что $\varepsilon_B = 0$, а $\varepsilon = 90 - \alpha_2$.

На рис. 2,а,б представлены расчётная схема и траектория движения куска, согласно которым для определения оптимальной скорости вращения барабана получены следующие системы уравнений:



а) силы, действующие на груз; б) траектория движения куска; в) зависимости оптимальной частоты вращения от коэффициента трения в проточной среде: 1, 2, 3 соответственно для барабана $D = 7 \text{ м}$; $D = 9 \text{ м}$; $D = 10,5 \text{ м}$

Рисунок 3 – Каскадный режим работы ММС

$$\begin{cases} \sum F_i y_i = -mg \cdot \sin(\alpha_2 - \varepsilon_B) - F_{\Pi} \sin \varepsilon_B + N = 0; \\ \sum F_i x_i = -F_{\Pi} \cos \varepsilon_B - T_{\text{тр}} + mg \cdot \cos(\alpha_2 - \varepsilon_B) = 0, \\ \begin{cases} y + \frac{y \operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \varepsilon} + \frac{g y^2}{2 R_2^2 \cos^2 \alpha_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \varepsilon} = 0; \\ x = -\frac{y}{\operatorname{tg} \varepsilon}, \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

где R_2 – радиус круговой траектории куска.

Решение уравнений (3) имеет вид соответственно:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{R_2} \cdot \frac{\cos(\alpha_2 - \varepsilon_B) - f \sin(\alpha_2 - \varepsilon_B)}{\cos \varepsilon_B + f \sin \varepsilon_B}}; \quad y_B = -\frac{2 R_2}{g} \operatorname{ctg}^2 \alpha_2. \quad (4)$$

Для определения оптимального значения угла α_2 находили точку встречи траектории движения куска с линией движения материала (см. рис. 2,б), исследовали выражение y_B (4) на экстремум и получили значение $\operatorname{ctg} \alpha_2 = 0$, которому соответствует угол $\alpha_2 = 90^\circ$. Так как в реальных условиях $\varepsilon_B \neq 0$, то уравнение (3) решалось при $\varepsilon_B = 10..12$ численным методом на компьютере. Оптимальное значение угла составило $\alpha_2 = 82..86^\circ$, согласно которому получили оптимальную скорость вращения барабана ω (4).

На рис. 2,в представлены зависимости оптимальной частоты вращения барабана от коэффициента трения при водопадном режиме.

Анализ полученных результатов показал, что при коэффициенте трения в проточной среде $f \leq 0,1$ оптимальная частота вращения барабана составляет $10,5 \text{ мин}^{-1}$ для ММС $D = 7 \text{ м}$; $9,75 \text{ мин}^{-1}$ для ММС $D = 9 \text{ м}$; $8,65 \text{ мин}^{-1}$ для ММС $D = 10,5 \text{ м}$ и снижается в 1,15 раза при увеличении диаметра барабана с 7 до 10,5 м.

Для каскадного режима работы ММС принимали следующие допущения: зона существования каскадного режима ограничивается углом α_3 , крупные куски распределены в материале и могут двигаться только по линии естественного откоса (прямая $y = -x \cdot \operatorname{tg} \varepsilon$, где ε – угол естественного откоса в движении).

На рис. 3,а,б представлены расчётная схема и траектория движения куска, согласно которым для определения оптимальной скорости вращения барабана получены следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} -F_{\Pi} \sin(\alpha_3 + \varepsilon) - f N + mg \cdot \sin \varepsilon = 0; \\ N = mg \cdot \cos \varepsilon - F_{\Pi} \cos(\alpha_3 + \varepsilon), \\ \begin{cases} y^2 - 2 R_3 y \cos \alpha_3 - 2 R_3 x \sin \alpha_3 + x^2 = 0; \\ y = -x \operatorname{tg} \varepsilon. \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

Решение уравнений (5) имеет вид соответственно:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{R_3} \cdot \frac{\sin \varepsilon - f \cos \varepsilon}{\sin(\alpha_3 + \varepsilon) - f \cos(\alpha_3 + \varepsilon)}}; \quad y_B = 2 R_3 \frac{\operatorname{tg} \varepsilon (\cos \alpha_3 \operatorname{tg} \varepsilon - \sin \alpha_3)}{\operatorname{tg}^2 \varepsilon + 1}. \quad (6)$$

Для определения оптимального значения угла α_3 находили точку встречи траектории движения куска с круговой траекторией мельницы радиуса R_3 (см. рис. 3,б), исследовали выражение y_B (6) на экстремум с применением программного обеспечения MathCad Professional на компьютере, определяли значения оптимального угла в пределах $\alpha_3 = 92..96^\circ$ и оптимальную скорость вращения барабана ω (6).

На рис. 3, в представлены зависимости оптимальной частоты вращения барабана от коэффициента трения, которая при $f = 0,1$ составляет $9,5 \text{ мин}^{-1}$ для ММС $D = 7 \text{ м}$; $8,75 \text{ мин}^{-1}$ для ММС $D = 9 \text{ м}$; $8,0 \text{ мин}^{-1}$ для ММС $D = 10,5 \text{ м}$ и снижается в 1,15 раза при увеличении диаметра с 7 до 10,5 м.

Таким образом, на основании выполненных исследований установлена расчётная оптимальная частота вращения барабана для каждого режима работы мельниц с различным диаметром барабана (табл. 1).

Таблица 1 – Расчётные значения оптимальной частоты вращения барабана ММС

№ п/п	Режимы работы ММС	Мельницы мокрого самоизмельчения								
		ММС 7,0×2,5			ММС 9,0×2,8			ММС 10,5×3,3		
		$n_{\text{кр}} - \text{крит. частота вращения, мин}^{-1}$	расчётные значения частоты, мин ⁻¹		$n_{\text{кр}} - \text{крит. частота вращения, мин}^{-1}$	расчётные значения частоты, мин ⁻¹		$n_{\text{кр}} - \text{крит. частота вращения, мин}^{-1}$	расчётные значения частоты, мин ⁻¹	
1	Прилифтерный	17,71	12,1	$0,72n_{\text{кр}}$	14,73	11,1	$0,75n_{\text{кр}}$	13,64	10,1	$0,74n_{\text{кр}}$
2	Водопадный	17,71	10,5	$0,62n_{\text{кр}}$	14,73	9,75	$0,66n_{\text{кр}}$	13,64	8,65	$0,64n_{\text{кр}}$
3	Каскадный	17,71	9,5	$0,58n_{\text{кр}}$	14,73	8,75	$0,60n_{\text{кр}}$	13,64	8,01	$0,60n_{\text{кр}}$

Анализ полученных результатов показал, что отношение расчётной оптимальной частоты вращения барабана к критической частоте зависит, главным образом, от режима работы и составляет для прилифтерного режима $(0,72..0,75)n_{\text{кр}}$, для водопадного – $(0,62..0,66)n_{\text{кр}}$, для каскадного – $(0,58..0,60)n_{\text{кр}}$. Экспериментальная проверка расчётных данных выполнялась на ММС 9,0×2,8 фабрики № 12 Удачинского ГОКа с фиксацией затрат удельной энергии на измельчение руды и средневзвешенного диаметра измельчённого материала на выходе из ММС и показала удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных данных [7]. Однако сохранность алмазов при этом экспериментально не исследовалась.

В экспериментальных исследованиях показателей ММС, выполненных в разное время институтами Якутнипроалмаз, МПТИ(ф) СВФУ и Ирриредмет на предприятиях АК «АЛРОСА» (фабрика 12 УГОК и фабрика 15 НГОК), принимались не только технологические показатели, но и потеря массы алмазов [2, 5, 8]. Испытания производились на ММС с диаметрами 9 м и 5 м, оснащённых преобразователями частоты вращения барабана (ПЧВ). Частота вращения барабана варьировалась с учётом установленных в [7] закономерностей и составила $(0,58..0,75)n_{\text{кр}}$ для ММС 9,0×2,8 и $(0,50..0,60)n_{\text{кр}}$ для TGL 5,0×2,3. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что оптимальными режимами работы мельниц по совокупности указанных выше критериев являются:

- $(0,60..0,65)n_{\text{кр}}$ для ММС 9,0×2,8, потеря массы алмазов 6,3-6,8 %;
- $0,50n_{\text{кр}}$ для TGL 5,0×2,3, потеря массы алмазов 5,6 %.

Частота вращения барабана мельниц $0,75n_{\text{кр}}$ не рекомендуется, так как технологическая повреждаемость алмазов увеличивается в 1,5-2,0 раза.

Таблица 2 – Результаты экспериментальной проверки повреждаемости алмазов

Пред-прия-тия	Объекты исследо-вания	Пас-порт-ный режим работы	Диаметр барабана, м	$n_{кр}, \text{мин}^{-1}$	За-полн. барабана φ , %	Потреб. мощн., кВт	Частота вращ. барабана при выполн. экс-перимента, мин^{-1}		Про-из-водит., т/ч	Удель-ный расход элект-ро-энер-гии, кВт ч/т	Средне-взвешен. диаметр зёрен, мм	По-теря массы крупн. алма-зов, %
Фаб-рика 12 УГОК	ММС 9,0×2,8 СЗТМ	0,6 $n_{кр}$	9,0	14,76	50	2020	8,5	0,58 $n_{кр}$	197	10,25	3,45-3,52	6,3-6,7
		0,65 $n_{кр}$	9,0	14,76	63	2280	8,75	0,60 $n_{кр}$	215	10,61	3,48-3,54	6,3-6,7
		0,7 $n_{кр}$	9,0	14,76	56	2368	9,75	0,65 $n_{кр}$	234	10,12	3,39-3,42	6,4-6,8
		0,75 $n_{кр}$	9,0	14,76	48	2880	11,0	0,75 $n_{кр}$	175	10,47	3,72-3,76	10-12
Фаб-рика 16 НГОК	TGL 5,0×2,3 Фирма «Све-дала»	0,60 $n_{кр}$	5,0	19,1	47	907	9,56	0,50 $n_{кр}$	95	9,50	3,01-3,05	5,65
		0,65 $n_{кр}$	5,0	19,1	43	875	9,75	0,52 $n_{кр}$	90	9,76	2,92-2,95	5,7
		0,75 $n_{кр}$	5,0	19,1	48	770	11,35	0,60 $n_{кр}$	82	9,45	2,97-3,02	5,7

После процесса измельчения руды в ММС следует её классификация в спиральных классификаторах или на грохотах, которые имеют резиновую или полиуретановую футеровку. Установлено [9], что при разделении алмазосодержащего сырья по классам повреждаемость алмазов не наблюдается.

Транспортирование руды на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА» выполняют ленточными конвейерами, автомобильным и гидравлическим транспортом. При применении конвейеров наиболее вероятна повреждаемость алмазов в пункте перегрузки и вероятностная модель при этом имеет вид:

$$P(A \cdot B \cdot C) = P(A) \cdot P(B) \cdot P(B/C), \quad (7)$$

где события A и B являются независимыми случайными событиями; события B и C являются совмещёнными случайными событиями; $P(A)$ – вероятность появления события A ; $P(B/C)$ – условная вероятность события C при условии осуществления события B .

Вероятность появления крупного куска на питателе k -той фракции определится по формуле

$$P(A) = \frac{n_k}{N}, \quad (8)$$

где n_k – количество крупных кусков k -той фракции; $d_{\max} \geq 0,4B_{\text{л}}$; N – общее количество крупных кусков $d_{\max} \geq 0,2B_{\text{л}}$ в объёме груза; $B_{\text{л}}$ – ширина конвейерной ленты.

При загрузке насыпного груза на ленточный конвейер на ленте образуется подпорный клин из мелкокусковых фракций. Крупные куски $a_{\max} \geq 0,4B_{\text{л}}$ разгружаются с питателя с задержкой относительно мелкокусковых фракций. За это время на ленте возникают пустоты и крупные куски взаимодействуют с роликоопорой или лентой. Вероятность того, что кусок будет взаимодействовать с элементами конвейера, определится по формуле

$$P(B) = 1 - \frac{l_{\text{под}} - v_{\text{л}}(t_3 + t_{\text{пад}})}{l_{\text{под}}}, \quad (9)$$

где t_3 – время задержки куска на питателе; $t_{\text{пад}}$ – время свободного падения куска при разгрузке с питателя; $l_{\text{под}}$ – длина подпорного клина; $v_{\text{л}}$ – скорость ленты.

Условная вероятность повреждения алмаза определится из выражения

$$P(B/C) = \frac{z \cdot Q}{m_a N \cdot n_b}, \quad (10)$$

где z – содержание алмазов в тонне алмазосодержащего сырья в каратах; Q – масса переработанного алмазосодержащего сырья; m_a – масса крупного алмаза в каратах; n_b – количество выступов у крупного куска.

Расчёты по формуле (7) с учётом (8), (9), (10) и при содержании 8,53 карата алмазов в одной тонне алмазосодержащего сырья, массе крупного куска 25 кг, массе крупного алмаза 5 карат и количестве выступов на крупном куске 5 показывают, что вероятность повреждения алмазов составляет 0,003.

Критериями возможного разрушения алмаза являются напряжение и удельная энергия при его взаимодействии с элементами конвейера. Если крупный кусок взаимодействует с роlikоопорой, то напряжение при ударе определятся по формуле

$$\sigma = P_{уд}/F_a \leq [\sigma], \quad (11)$$

где σ – реальное напряжение при ударе; $P_{уд} = 0,22\gamma K_d g d_{\max}^3$ – сила взаимодействия крупного куска с элементами конвейера; K_d – коэффициент взаимодействия крупного куска с элементами конвейера; $[\sigma] = 890$ МПа – допустимое значение напряжения на сжатие, при котором происходит разрушение алмаза; F_a – площадь взаимодействия алмаза с элементами конвейера.

Вторым критерием разрушения алмаза является удельная энергия взаимодействия:

$$\Theta_b = 0,22gH\gamma d_{\max}^3/F_a \leq [\Theta_b], \quad (12)$$

где H – высота падения куска на ленту; g – ускорение свободного падения; F_a – площадь взаимодействия алмаза с элементами конвейера; $[\Theta_b]$ – допустимая удельная энергия, при которой алмаз повреждается.

Согласно теории удельная энергия, необходимая для повреждения алмазов по плоскостям спайности, составляет 48 Дж/м². Расчётами установлено, что наиболее значимым критерием является удельная энергия взаимодействия.

Для транспортирования алмазосодержащего сырья гидравлическим транспортом на обогатительных фабриках применяются центробежные насосы, оснащённые профилированными лопатками. Каждая частица пульпы выходит из рабочего колеса по траектории, близкой к спирали, с увеличивающимся радиусом и скоростью движения и взаимодействует с отводом. Сила удара частицы об отвод происходит под углом $\alpha = 15^\circ$ и определяется как $P_{уд} = m \cdot a_a$, где m – масса частицы; a_a – абсолютное ускорение в момент удара. Составляющими силы удара являются сжимающая и сдвигающая силы, первая из которых разрушает алмаз силой сжатия $P_{сж}$, а вторая преобразуется в энергию сдвига кристаллической решётки $\Theta_{сдв}$:

$$\sigma = \frac{P_{сж}}{F_a} \leq [\sigma]; \quad \Theta_{сдв} = \frac{mc_a^2}{2} \leq [\Theta_b], \quad (13)$$

где c_a – абсолютная скорость движения частицы.

Расчёты по формулам (13) показали, что сил сжатия для разрушения алмазов недостаточно, а возникающая удельная энергия взаимодействия для алмазов крупностью свыше 8 мм превышает допустимое значение.

Выводы. Таким образом, разрушение алмазов происходит при взрыве алмазосодержащего сырья, дроблении в дробилках и прессах высокого давления, самоизмельчении в ММС, транспортировании ленточными конвейерами и гидравлическим транспортом. Для снижения техногенной повреждаемости алмазов необходимо применять: скважинные заряды с воздушным промежутком и ЭВВ «Ирмекс» в качестве основной (нижней) части скважинного заряда; валковые прессы с системой регулирования предельного усилия сжатия; оптимальные режимы работы мельниц в зависимости от их типоразмеров; ленточные конвейеры с амортизаторами вместо гидравлического транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев, В.М. Повышение сохранности алмазов при добыче и обогащении – одно из ключевых направлений инновационной политики АК «АЛРОСА» / В.М. Зуев // Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений: сб. докладов Международной научн.-прак. конф. – Новосибирск: Наука, 2011. – 584 с.
2. Коноваленко, В.Я. Результаты натурных экспериментальных исследований техногенной повреждаемости кристаллов алмаза в процессе взрывной отбойки, механического дробления и измельчения / В. Я. Коноваленко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых: сб. научн. трудов. – Новосибирск: Изд. Сибирского отделения РАН. – 2005. – №1. – С. 63-71.
3. Бондаренко, И.Ф. Влияние параметров взрыва на повреждаемость алмазов / И. Ф. Бондаренко, В. Ф. Монастырский // Горный журнал. – 2002. – №4. – С. 37-40.
4. Firm Kluff starts to carry out the project of processing of diamonds in Copeton // Mining Mag. – 1990. – №1. – Pp. 62-68.
5. Рахмеев, Р.Н. Изучение повреждаемости алмазов при доизмельчении кимберлитов в валковом прессе высокого давления / Р.Н. Рахмеев, А.В. Прокопенко, Р.В. Кононко [и др.] // Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений. – Новосибирск: Наука. – 2011. – С. 318-322.
6. Зырянов, И.В. Исследование особенностей взрывного разрушения кимберлитов в глубоких карьерах АК «АЛРОСА» / И.В. Зырянов, И.Ф. Бондаренко, В.И. Хон, Е.Н. Черных // Горный журнал. – 2015. – №6. – С. 41-44.
7. Монастырский, В.Ф. Оптимизация режимов мельниц самоизмельчения при обогащении алмазосодержащего сырья / В.Ф. Монастырский, С.В. Соловьев // Горный журнал: Известия ВУЗов. – 2004. – №6. – С. 45-49.
8. Монастырский, В.Ф., Соловьев С.В. О повреждаемости кристаллов алмазов при измельчении алмазосодержащего сырья в ММС / В.Ф. Монастырский, С.В. Соловьев // V конгресс обогатителей стран СНГ, 23-25 марта 2005 г. – М.: МИСиС. – 2005. – Т. 1. – С. 257-259.
9. Ведин, В.Т. Информационная записка по результатам исследований с целью изучения влияния на сохранность алмазов предварительного грохочения исходного материала перед процессом самоизмельчения / В.Т. Ведин, А.Ф. Бондаренко. – Мирный: Якутинпроалмаз, 1995. – С. 20-28.

REFERENCES

1. Zuyev, V.M. (2011), "Increasing the safety of diamonds in mining and beneficiation – one of the key areas of the innovation policy of AK ALROSA", *Problems and ways of effective mining of diamondiferous deposits*, Nauka, Novosibirsk, RF.
2. Konovalenko, V.Ya. (2005), "Results of full-scale experimental studies of technogenic damage to diamond crystals in the process of explosive breaking, mechanical crushing and grinding", *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*, no. 1, pp. 63-71.
3. Bondarenko, I. F. (2002), "Influence of explosion parameters on diamond damage", *Mining Journal*, no. 4, pp. 37-40.
4. Firm Kluff starts to carry out the project of processing of diamonds in Copeton (1990), *Mining Mag.*, no. 1, pp. 62-68.
5. Rakhmetyev, R.N., Prokopenko, A.V. and Kononko, R.V. (2011), "The study of diamond damage at the re-grinding of kimberlites in a high pressure roll press", *Problemy i puti effektivnoy obrabotki almazonosnykh mestorozhdeniy* [Problems and ways of effective mining of diamondiferous deposits], Nauka, Novosibirsk, RF, pp. 318-322.
6. Zyryanov, I.V., Bondarenko, I.F., Khon, V.I. and Chernykh, Ye.N. (2015), "Investigation of the features of explosive destruction of kimberlites in the deep open pits of AK ALROSA", *Mining Journal*, no. 6, pp. 41-44.
7. Monastyrsky, V.F. and Solovyev, S.V. (2004), "Optimization of regimes of self-grinding mills during the enrichment of diamond-containing raw materials", *Mining Journal*, no. 6, pp. 45-49.
8. Monastyrsky, V.F. and Solovyev, S.V. (2005), "On the damageability of diamond crystals in the grinding of diamond-containing raw materials in MMC", *V kongress obogatiteley stran SNG* [V Congress of the Enrichers of the CIS Countries], Moscow, Russia, March 23-25, pp. 257-259.
9. Vedin, V.T. and Bondarenko, A.F. (1995), *Informatsionnaya zapiska po rezultatam issledovaniy s tselyu izucheniya vliyaniya na sokhrannost almazov predvaritelnogo grokhocheniya iskhodnogo materiala pered protsessom samoizmelcheniya* [Information

note on the results of studies to study the effect on the safety of diamonds of preliminary screening of the starting material before the self-crushing process], Yakutniiproalmaz, Mirnyy, RF.

Об авторах

Монастырский Виталий Федорович, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник в отделе физико-механических основ горного транспорта, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, vfmon@mail.ru

About the authors

Monastyrsky Vitaly Fedorovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Senior Researcher in Department of Mining Transport Physics and Mechanics, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, vfmon@mail.ru

Анотація. У цій статті представлено результати наукових і практичних праць по дослідженню процесів ушкодження алмазів при переробці сировини, що містить алмази, в переділі рудопідготовки. Розглянуто питання ушкодження алмазів при вибуху, додробленні в дробарках і пресах, подрібненні в ММС і транспортуванні руд, що містять алмази, стрічковими конвеєрами і гідравлічним транспортом. Установлено, що збереження алмазів підвищується при застосуванні оптимальних параметрів технологічних операцій. При цьому технологія ведення вибухових робіт передбачає регулювання енергетичної дії на забій так, щоб кімберліт піддавався руйнуванню раніше, ніж вибухова хвиля досягне кристала алмазу і він не встигне сприйняти її дію із-за об'ємного стискування навколишніми породами. У технологічних операціях додроблення відбувається об'ємне стискування кімберлітів і вільних алмазів, регулювання якого повинне забезпечуватися пристроями з контролем граничного зусилля стискування. При подрібненні сировини, що містить алмази, в ММС ушкодження алмазів знаходиться в прямій залежності від режимів її роботи. Оптимальним режимом є каскадний, при якому ушкодження алмазів зменшується в 1,5-2 рази. При транспортуванні сировини, що містить алмази, стрічковими конвеєрами або гідравлічним транспортом значущим фактором є енергія взаємодії алмазу з елементами конвеєра або відводом гідравлічного насоса. При цьому вірогідність ушкодження алмазів в пункті завантаження конвеєра в 3 рази менше, ніж в гідравлічному насосі. Рекомендовано застосовувати свердловинні заряди з повітряним проміжком і ЕВВ «Ірмекс»; преса для додроблення з системою граничного стискування, при якій реальна напруга в алмазі не перевершує допустимих; оптимальну частоту обертання барабана ММС: $(0,60 \div 0,65)n_{кр}$ для ММС $9,0 \times 28$; $0,50n_{кр}$ для TGL $5,0 \times 2,3$; стрічкові конвеєри, обладнані в пункті завантаження роликотопорами з амортизаторами.

Ключові слова: ушкодження алмазу, технологічна операція, вибух, параметри, режим, прес, дробарка, млин, конвеєр, насос, енергія, напруга, вірогідність.

Abstract. In the article, results of scientific and practical studies of diamond damaging during technological operations are presented. Problems of diamond damaging due to explosions, in the crushers, presses, due to the grinding wet autogenous mills and during transportation by the belt conveyors and hydraulic transport are considered. It is established that integrity of diamonds is better at optimal parameters of technological operations. Technology of shooting operations assumes adjusting of explosion energy effected on the face in such a way when kimberlite is destructed before the explosive wave reaches crystal of the diamond giving the crystal no chance to be damaged due to the compression of surrounding rocks. During the technological operations, volume of kimberlite and free diamonds is compressed, and proper rate of the compression should be provided by the devices with controlled maximum rate of compression. When diamond-contained raw materials are ground by the wet autogenous mills, diamond damaging directly depends on the mill's operational mode. The optimal mode is cascade: diamond damaging is 1.5-2 times less. When raw material is transported by the belt conveyor or hydraulic transport, the most important factor is power of interaction between diamond and elements of conveyor or discharge sector of hydraulic pump. Probability of diamond damaging in the charge sector of conveyor is 3 times less than in hydraulic pump. It is recommended to use bore-hole charges with air interval; ore-crushing presses with system of controlled compression maximum; optimal frequency of drum rotation in the wet autogenous mills: $(0.60-0.65)n_{cr}$ for wet autogenous mills $9,0 \times 2,8$; and $0.50 n_{cr}$ for TGL 5.0×2.3 ; belt conveyor equipped with roller carriages and shock absorber installed in the charge sector.

Keywords: diamond damaging, technological operation, explosion, parameters, mode, press, crusher, mill, conveyor, pump, energy, tensions, probability.

Статья поступила в редакцию 07.02.2018

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Минеевым