

класифікацію в гідроциклонах або на дугових ситах і в гідроциклонах. Надрешітний продукт грохочення дробиться в конусній дробарці і повертається в млин.

Висновки

У статті узагальнено досвід інституту «Механобрчермет» з проектування збагачувальних фабрик залізних руд для Криворізького басейну. Описано раціональні компоновки обладнання при одно- і двостадійному подрібненні руд. Запропоновано раціональні проектно-компоновальні рішення відділень подрібнення з млинами типу «Каскад», які включають вузли класифікації, грохочення, подрібнення і виділення гальки. Запропоновано інноваційну технологічну схему рудопідготовки для технології збагачення магнетитових руд.

Список літератури

1. Смирнов В.О., Білецький В.С. Проектування збагачувальних фабрик (видання друге). – Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. – 269 с.
2. Федотов К.В., Никольская Н.И. Проектирование обогатительных фабрик. – М.: Издательство Горная книга, 2012. – 536 с.
3. Підготовка корисних копалин до збагачення: монографія / М.І. Сокур, В.С. Білецький, О.І. Єгурнов та ін. – Кременчук: Кременчуцький національний ун-т ім. М. Остроградського, Академія гірничих наук України. ПП Щербатих О.В., 2017. – 392 с.
4. Дезінтеграція мінеральних ресурсів: монографія / М.І. Сокур, М.В. Кіяновський, О.М. Воробйов та ін. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2014 – 304 с.

© Сокур М.І., Білецький В.С., Смирнов В.О., 2019

*Надійшла до редколегії 05.09.2019 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*

УДК 622.73

<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.28998.09281>

М.Н. ТРУБИЦІН, канд. техн. наук
(Україна, Днепр, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»),
Е.В. ТЕРНОВАЯ, канд. техн. наук
(Україна, Днепр, Институт технической механики НАН и ГКА Украины)

ОЦЕНКА ДЕФОРМАТИВНОСТИ ОБЕЧАЙКИ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ КАСКАДНОМ РЕЖИМЕ

Постановка проблемы. Процессы измельчения в барабанных рудоизмельчительных мельницах с каждым годом приобретают все большую актуальность. Это определяется, прежде всего, необходимостью ведения более тонкого измельчения (до класса 40 мкм и ниже) в связи с практически повсеместным ухудшением качества добываемых руд (снижением содержания минералов и

увеличением тонковкрапленности), а также возрастанием спроса на рынке на продукты измельчения.

Барабанные мельницы широко применяются на горно-обогатительных предприятиях для измельчения полезных ископаемых. Процесс измельчения один из наиболее энергоемких процессов на обогатительных предприятиях, поэтому совершенствование технологии работы барабанных мельниц имеет важное практическое значение.

Широкое распространение барабанных мельниц определяется простотой конструкции, высокой часовой производительностью. Однако у них есть существенные недостатки: высокая удельная металло- и энергоемкость, низкий коэффициент полезного действия (КПД); низкая энергонапряженность процесса измельчения ввиду малых скоростей воздействия мелющих тел на измельчаемый материал – около 50% мелющих тел не участвуют в процессе измельчения; рабочий объем мельницы используется на 35%; большой удельный расход мелющих тел и материала футеровки.

Вышеизложенное определяет актуальность решения задачи увеличения эффективности помола при получении различных продуктов в промышленности путем модернизации конструкции барабанной мельницы и выбора оптимального режима работы.

Барабан – представляет собой сложную обечаечную конструкцию, которая изготавливается из толстолистовой стали. К цилиндрической части барабана на болтах крепятся торцовые днища. Внутри барабан выложен футеровкой из стальных плит для предохранения от износа. На цилиндрической части барабана имеется люк, который служит для осмотра мельницы, ее ремонта и для заполнения дробильной камеры шарами. Торцовые днища для предохранения их от износа и непосредственных ударов мелющих шаров также выложены футеровкой. В центре днищ имеются круглые отверстия, переходящие в полые цапфы, которыми барабан опирается на два массивных коренных подшипника. Через одну цапфу производится загрузка мельницы дробимым материалом, а через другую удаляется измельченный материал. Загрузочное устройство обеспечивает равномерную подачу материала, подлежащего дроблению.

Барабаны, не смотря на колоссальные запасы прочности, в некоторых случаях разрушаются (и обечайки, и торцевые стенки), что может происходить за счет превышения напряжения $[\sigma]$, и за счет накопления усталости, то есть неверно определенных параметров циклической загрузки. От прочностных и массовых характеристик барабана зависит надежность процесса измельчения, работа, выбор мощности двигателя и, следовательно, потребление энергии.

При оптимальных режимах измельчения необходимо знать правильную загрузку рабочей поверхности барабана мельницы в зависимости от относительной скорости вращения барабана (ψ), относительного заполнения барабана (φ), коэффициента трения внутримельничной загрузки от рабочей поверхности барабана (f_1). Учет коэффициента внутреннего трения внутримельничной загрузки сыпучей среды $f_{ср}$, как сложной многокомпонентной изменяемой среды (ру-

да, шары различных диаметров, вода), возможно представить по данным Науменко и Дейнека [1-4] с постоянным значением $\arctg(f_{cp}) = 30^\circ$. Представление внутримельничной загрузки в виде сыпучей среды, со своей насыпной плотностью γ и постоянным коэффициентом трения по рабочей поверхности барабана f_1 позволяет в зависимости от ψ построить две традиционные эпюры движения внутримельничной загрузки – каскадного и водопадного режимов.

Переходные процессы – пуск, остановка, скачкообразное изменение скорости ψ или значения φ увеличивают возникающее напряженно-деформированное состояние барабана.

Проведение экспериментальных исследований по деформативности обечайек является актуальной задачей. Ранее такие эксперименты проводились на пластиковой лабораторной установке в УДН им. П. Лумумбы, путем имитации гравитационного нагружения от внутримельничной загрузки.

В работах [5] Сокур Н.И. проводил экспериментальные исследования на промышленной мельнице и рассматривал режимы близкие к пусковым. Так же проводил эксперименты на лабораторной установке при 3-6 кратном нагружении в центрифугах.

Исследования Крюкова [6] касались только замера доминирующих радиальных воздействий, но по указанной методике невозможно рассматривать тангенциальное (касательное) давление.

Проблема состоит в необходимости выбора надежной расчетной схемы, позволяющей оценить механическое воздействие внутримельничной загрузки на рабочую поверхность барабанной мельницы.

Цель работы – разработка методики проведения замера суммарного воздействия сыпучей среды (внутримельничной загрузки), позволяющего оценить косвенную нагрузку по напряженно-деформированному состоянию обечайки.

Содержание исследований. Для теоретического определения воздействия внутримельничной загрузки используем графоаналитический метод проф. Крюкова. Эпюры построения внутримельничной загрузки зависят от ψ , φ , f_1 . На рисунке 1 представлена имитация загрузки рабочей поверхности барабанной мельницы с сосредоточенными усилиями при теоретических режимах движения загрузки.

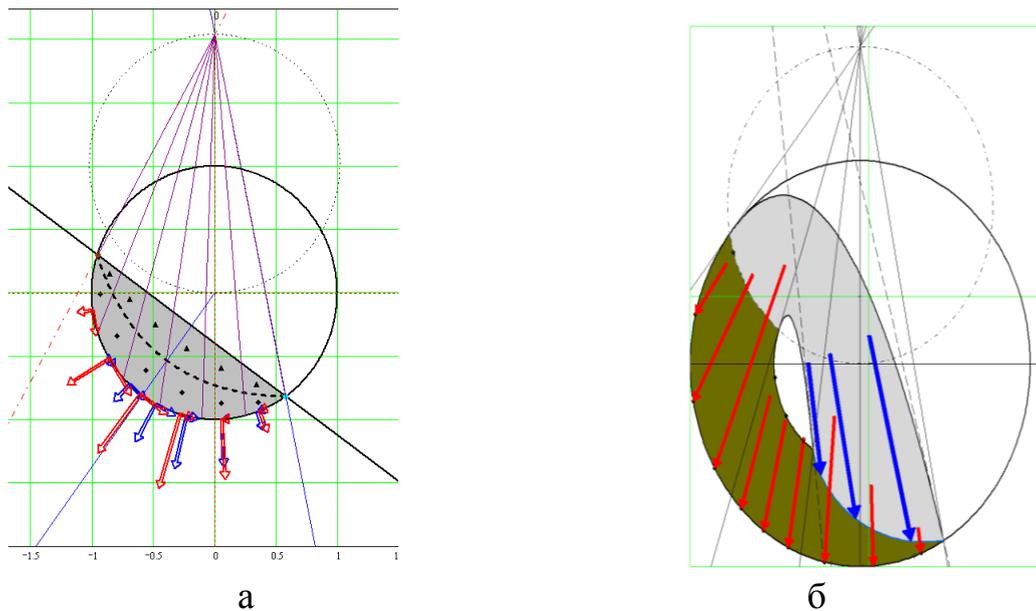


Рис. 1. Имитация загрузки рабочей поверхности барабанной мельницы сосредоточенными усилиями при теоретических режимах движения загрузки: а – каскадный режим; б – водопадный режим

Усилия от действия гравитации, сил инерции и падающей массы переносятся на рабочую поверхность барабана, где раскладываются на радиальные и тангенциальные составляющие. Эпюра деформаций от единичных усилий шпангоута и аналитические выражения их определения представлены на рис. 2.

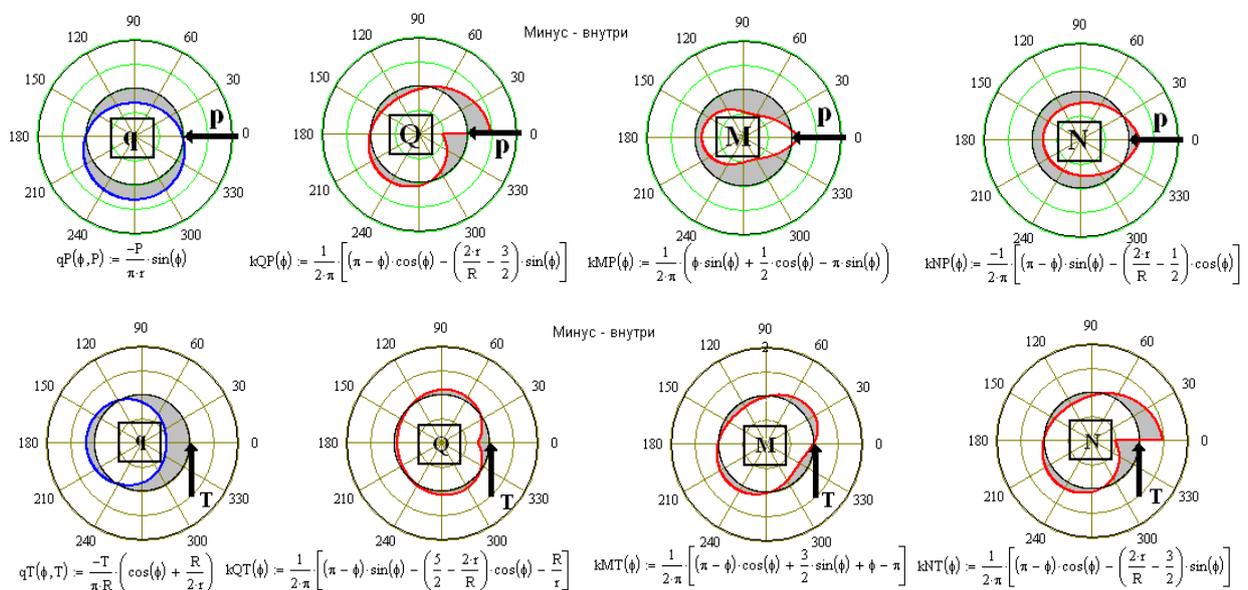


Рис. 2. Эпюра деформаций от единичных усилий шпангоута

Суммарное воздействие по правилам сопромата определяется обыкновенным суммированием всех воздействий отдельных усилий. Аналогично определяется и суммарная деформация.

В работе для шаровой загрузки принято $\gamma=4,6 \text{ т/м}^3=4,6 \text{ кГ/дм}^3$.

Описание лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований приведено ниже на рисунке 3.

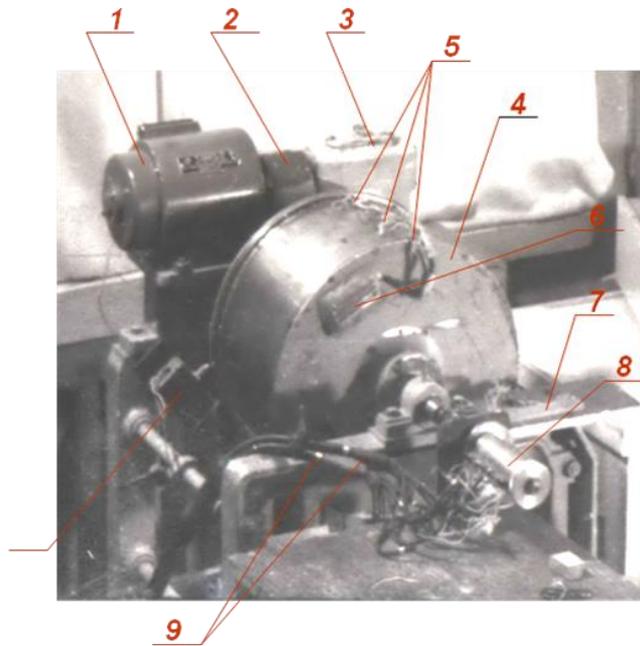


Рис. 3. Лабораторная установка барабанной мельницы:

- 1 – электродвигатель ЭП-110/245У31Р13 (0,25 кВт, 110 В, 3,27 А, 4000 об/мин);
- 2 – эластичная муфта; 3 – червячный редуктор; 4 – барабан мельницы;
- 5 – розетки рабочих тензодатчиков 2ПКБ-20-200; 6 – пакетник;
- 7 – компенсационные тензодатчики; 8 – ртутный токосъемник;
- 9 – соединительные провода; 10 – датчик положения образующей с тензорезисторами

Эксперименты на данной установке проводились давно, в отсутствии современной компьютерной техники и теоретических данных по каскадному и водопадному режимам, возможности проведения сложных расчетов. Изменившиеся условия, опыт подобного рода исследований привели к реальной возможности анализа данных сейчас. Относительную деформацию измеряли с помощью тензодатчиков, расположенных на обечайке. При одинаковой чувствительности каналов определено, что большие деформации дает датчик в окружном направлении.

Изгиб мельницы как балки (в опорных подшипниках) от весовых нагрузок показан на рисунке 4.

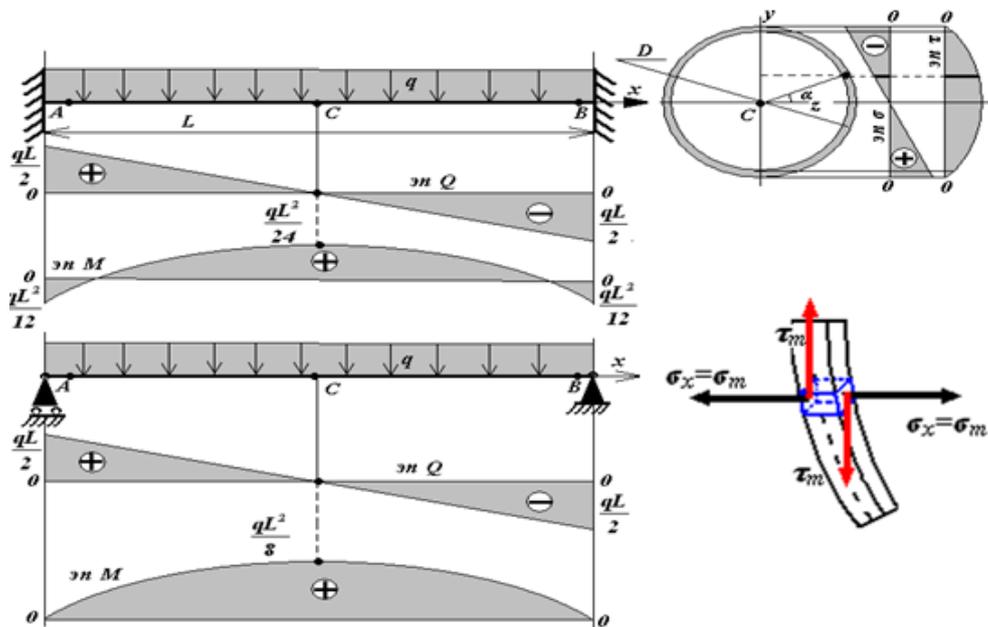


Рис. 4. Изгиб мельницы от весовых нагрузок

В центральном сечении C $Q=0$, $\tau_m=0$

$$\sigma_m = -\frac{M_C \cdot y}{J_z} = -\frac{M_C R_1 \sin \alpha}{J_z} = -0,775 \cdot \varphi \cdot \sin \alpha \quad [\text{МПа}], \quad (1)$$

где $M_C = \frac{qL^2}{24} = 541,925 \cdot \varphi \quad [\text{Н} \cdot \text{см}]$,

$$q = \frac{G_{\text{ВМЗ}}}{L} = 32,515 \cdot \varphi \quad \left[\frac{\text{Н}}{\text{см}} \right].$$

Изгиб кольцевого элемента мельницы (шпангоута) показан рис. 5.

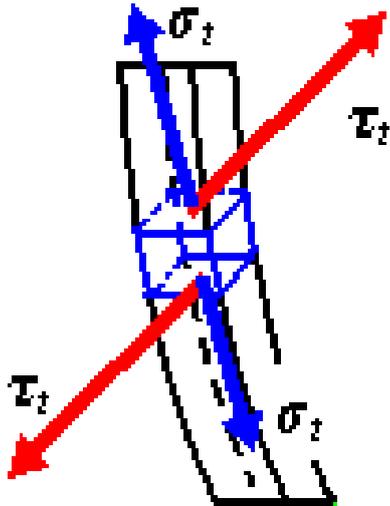


Рис. 5. Изгиб кольцевого элемента мельницы (шпангоута)

Расчет кольца-шпангоута дает величины тангенциальных напряжений σ_t и τ_t , которые приведены ниже на рис. 6, где также приведено сравнение теоретических и экспериментальных данных.

<i>Критическая скорость вращения $\omega_{кр}=8,087$ 1/с</i>					
<i>Материал обечайки – НЖ сталь $E=200$ГПа, $\mu=0,25$</i>					
<i>Удельный вес ВМЗ (стальные шарики $d=5$мм) $\gamma=4,6$т/м³</i>					
<i>Заполнение барабана $\phi=50$ %</i>					
<i>Напряжения:</i>		$\sigma_t = \left(\frac{6M \cdot R_t}{b\delta^2} + \frac{N}{b\delta} \right) \quad \sigma_m = 0,775 \cdot \phi \cdot \cos \alpha$			
<i>Деформации:</i>		$\varepsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_t - \mu\sigma_m) \quad \varepsilon_m = \frac{1}{E} (\sigma_m - \mu\sigma_t)$			
<i>Теоретические режимы</i>	<i>Параметры</i>	<i>Относительная скорость вращения, %</i>			
		19,4	42,5	64,3	86,3
<i>Каскадный режим</i>	$\Theta, ^\circ$ при $f_f=0,2$	17,155	18,889	21,716	23,635
	<i>Отклонения по ε_b %</i>	22	19	18	15
<i>Водопадный режим</i>	к	<i>Теоретические исследования не проводились – этуру Дэвиса построить невозможно, т.к. уравнение Канторовича-Осецкого не имеет решения</i>			0,616
	кГ				0,387
	кГУ				0,211
	<i>Отклонения по ε_b %</i>				24

Рис. 6. Сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Полученное расхождение экспериментальных и теоретических результатов (количественное – по величинам относительных деформаций 18-24% и каче-

ственное – различие в расположении пиков разверток деформаций) связано не только с погрешностями аппаратуры, лабораторной модели и проводимых измерений и сравнений, а и не совсем удачным выбором сочленения теоретических методик определения воздействия ВМЗ (теоретические КР и ВР) и нахождения деформированного состояния короткой обечайки, как шпангоута.

Выводы

1. Предлагаемая методика дает возможность проведения оценки возникающего напряженно деформированного состояния наиболее дорогостоящей детали мельницы – барабана.

2. Подтверждены известные гипотезы теории оболочек вращения об имеющем место плоском напряженном состоянии и о значительном превышении возникающих тангенциальных напряжений.

3. Для уточнения проводимых исследований необходимо рассматривать уточненные режимы движения ВМЗ с: учетом проскальзывания всей загрузки; выделением переходных зон (например, пяты отката), в которых возможно возникновение всплесков давления на рабочую поверхность мельницы.

Список литературы

1. Науменко Ю.В. Основы теорії режимів роботи барабанних млинів : монографія / Ю.В. Науменко. – Рівне, 2009. – 282 с.
2. Науменко Ю.В. Основы теорії робочих процесів барабанних млинів : монографія / Ю.В. Науменко; Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування. – Рівне : НУВГП, 2014. – 336 с.
3. Науменко Ю. В. Теоретичні основи робочих процесів машин барабанного типу : монографія / Ю.В. Науменко, К.Ю. Дейнека; Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування. – Рівне : НУВГП, 2014. – 531 с.
4. Науменко Ю.В. Рекомендації до розрахунку, проектування та експлуатації барабанних млинів багатостадійного подрібнення / Ю.В. Науменко. – Рівне : Вид-во СПД О.І.Зелент, 2009. – 88 с.
5. Сокур Н.И. Дробление и измельчение руд / Н.И. Сокур, В.Н. Потураев, Е.К. Бабец. – Кривой Рог: ВЭЖА, 2000. – 290 с.
6. Крюков Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий. – М.: Недра, 1966. – 174 с.

© Трубицин М.Н., Терновая Е.В., 2019

*Надійшла до редколегії 12.09.2019 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*