

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БАРАБАНА МЛИНА САМОПОДРІБНЕННЯ В ПОЛІ ВІДЦЕНТРОВИХ СИЛ

Микола Сокур

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20, Кременчук, Україна, 39600
ORCID: 0000-0001-6779-3293

Роман Аргат

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20, Кременчук, Україна, 39600, argat.rg@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9247-5297

Володимир Білецький

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, ukcdb@i.ua
ORCID: 0000-0003-2936-9680

Денис Божик

ПрАТ «Суха Балка», вул. Конституційна, 5, Кривий Ріг, Україна, 50000
ORCID: 0000-0001-7620-7997

Метою цієї роботи є одержання моделей напруженого стану елементів барабана млина самоподрібнення з використанням теорії подібності та імітацією навантаження в полі відцентрових сил. Метод дослідження – фізичне моделювання роботи барабана млина самоподрібнення. При цьому експериментальні дослідження напруженого стану моделі барабана млина самоподрібнення виконані на спеціальному стенді, що складався з центрифуги, в якій навантажується модель барабана. Для вимірювання напруження застосовувалися тензорезистори опору 100 Ом і базою 10 мм, з'єднані за напівмостовою схемою, та комплект тензометричної апаратури, що складається з блоку живлення, підсилювача 8АН4-7м і осцилографа Н-700. Експериментально одержані епюри розподілу напружень в елементах конструкції барабана млина, зокрема, торцевих стінках і обичайці барабана, а також у ребрах жорсткості стінок і обичайки. Визначено значення напружень у всіх замірних точках моделей барабанів без ребер жорсткості і з ребрами. Аналіз впливу ребер жорсткості і типу опор підшипників на напружений стан барабана млина показує, що напруження в торцевій стінці барабана млина мають знакозмінний характер і збільшуються до цапфи. Посилення тільки торцевої стінки радіальними ребрами жорсткості приводить до зниження напружень у стінці на 20%. Підсилення барабана млина сумірними ребрами жорсткості на торцевій стінці та обичайці приводить до зниження напружень у торцевій стінці на 35–50% і зменшення концентрації напружень біля цапфи. Застосування сферичних самоустановлювальних опор підшипників барабана дозволяє суттєво знизити напруження в торцевих стінках, підвищити міцність, надійність та довговічність барабана. Встановлено вплив типу опор підшипників (вальниці) і ребер жорсткості на характер розподілу напружень у барабані млина. Одержані результати можуть бути використані у разі модернізації наявних і оптимізації конструкції нових млинів самоподрібнення.

Ключові слова: млин самоподрібнення, фізичне моделювання, конструкція млина, торцева стінка та ребра жорсткості, опори підшипників барабана.

Актуальність роботи. Проблема моделювання напруженого стану барабана млина самоподрібнення має два аспекти, які утруднюють задачу. По-перше, моделювання багатотоннажних млинів самоподрібнення (AG) та напівсамоподрібнення (SAG) показує значні проблеми, пов'язані з труднощами в отриманні високоякісних даних для промислових об'єктів, що суттєво ускладнює експеримент [1]. У роботі [2]

успішно розроблено динамічну модель напівсамоподрібнення руди. Набір звичайних диференціальних рівнянь було вирішено за допомогою платформи графічного програмування MATLAB/SIMULINK. Модель протестовано та перевірено на продуктивності самоподрібнення 1800 т/год у умовах міднорудного комбінату.

По-друге, проблемою є моделювання умов роботи конструктивних елементів млинів само-

подрібнення. Для дослідження напруженого стану конструкцій прийнято використовувати імітації навантаження в полі відцентрових сил [3; 4]. Зокрема, навантаження моделей у полі відцентрових сил з використанням теорії подібності знаходить застосування в авіаційній техніці, однак для дослідження напруженого стану елементів млинів раніше не використовувалося.

Барабани більшості типорозмірів вітчизняних і зарубіжних млинів самоподрібнення оснащені ребрами жорсткості. Думка вчених про вплив ребер жорсткості на величину і характер розподілу напружень у барабані млина неоднозначні [5], що зумовлює необхідність додаткових досліджень. Актуальність дослідження напруженого стану конструкцій млина показана також у роботах [6–9].

Мета статті – одержання моделей напруженого стану елементів барабана млина самоподрібнення

з використанням теорії подібності та імітацією навантаження в полі відцентрових сил.

Матеріал і результати досліджень. Авторами проведені детальні дослідження у стендових і промислових умовах. Дослідження у стендових умовах проводилися на моделях барабана млина ММС-90-30А, виготовлених у масштабі 1:20 з того ж матеріалу, що й натура, зі збереженням геометричної та силової подібності. Для проведення досліджень спроектовано і виготовлено моделі барабанів трьох типів: без ребер жорсткості, з ребрами жорсткості тільки на торцевій стінці, з ребрами на торцевій стінці та обичайці барабана (рис. 1).

Дослідження напруження в барабані млина. Напруження в барабані млина досліджувалися на спеціальному стенді, що складався з центрифуги, в якій навантажуються модель барабана, і комплекту тензометричної апаратури (рис. 2).

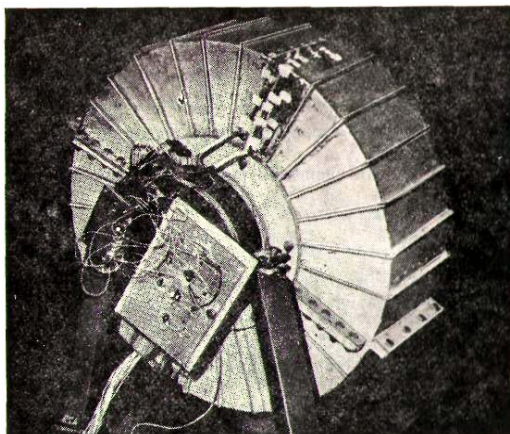


Рис. 1. Модель барабана млина самоподрібнення

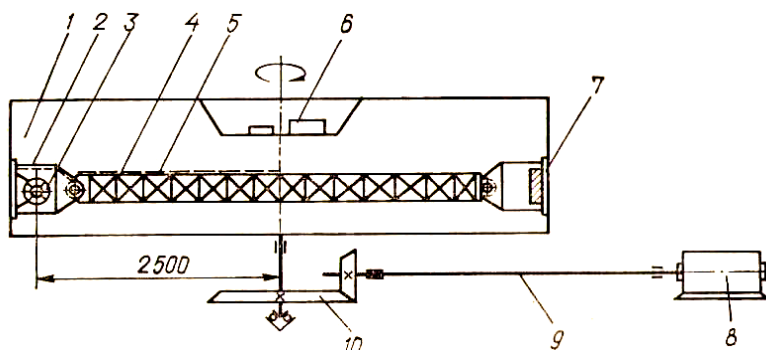


Рис. 2. Схема стенда для проведення досліджень напруженого стану моделей барабанів млинів різної конструкції: 1 – корпус центрифуги; 2 – возик для установки моделі; 3 – модель барабана; 4 – коромисло; 5 – провідники; 6 – вимірювальна апаратура; 7 – контрвантаж; 8 – приводний електродвигун; 9 – вал; 10 – редуктор

Методика дослідження докладно викладена у роботі [10]. Для такого випадку моделювання визначальними параметрами є діаметр барабана B (м), коефіцієнт Пуассона ν (безрозмірний), модуль пружності E , густина пульпи ρ (кг/м³), діюче навантаження F (Н).

Отже, визначальних параметрів – 5, параметрів з незалежними розмірностями – 2. Виходячи з цього, в такому випадку для забезпечення фізичної схожості є три комплекси ν , $E/\rho g D$, ρ/ED^2 .

Оскільки моделі виготовляються з того ж матеріалу, що й натура, параметри ρ , ν і E у моделі і натурі однакові. Тому для дотримання механічної подібності повинні виконуватися такі умови: $gD = \text{const}$, $\rho/D^2 = \text{const}$. За прийнятого масштабу моделювання $D_m = (1/20)D_n$, $g_n = 20g$, де D_m , D_n – діаметри барабана моделі і натурі; g_n , g – прискорення відцентрової сили і сили тяжіння.

Необхідна частота обертання ротора центрифуги визначається так:

$$g_n = \omega^2 R = 20g; \quad w = \sqrt{20g/R}; \quad \omega = \sqrt{\frac{20 \cdot 9,81}{2,5}} = 8,85 \text{ с}^{-1}; \quad n = 60$$

$$\frac{\omega}{2\pi} = 60 \frac{8,85}{2 \cdot 3,14} = 85 \text{ хв}^{-1}.$$

Маса завантаження в модель барабана млина визначається виходячи з умов: об'єм робочого простору барабана натурі – $V=160 \text{ м}^3$, коефіцієнт заповнення – $\phi=0,45$, $\rho=0,62$, можливий коефіцієнт перевантаження – $K_1=1,15$, насипна маса руди – $\gamma=2,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, тоді маса завантаження – $P_m=18 \text{ кг}$.

У разі визначення таким чином параметрів моделювання досліджується напруження в елементах конструкції барабана млина з різною частотою обертання ротора центрифуги на моделях барабана без ребер жорсткості, з ребрами тільки на торцевих стінках і з ребрами на стінках і обичайки.

Для вимірювання напруження застосовувалися тензорезистори опору 100 Ом і базою 10 мм, з'єднані за напівмостовою схемою, та комплект тензометричної апаратури, що складається з блоку живлення, підсилювача 8АН4-7м і осцилографа Н-700. Тензорезистори наклеюються ціакриновим клеєм, завдяки чому спрощується технологія наклейки і відпадає необхідність термообробки наклеєних тензометричних мостів. Схеми розташування тензорезисторів на моделі барабана млина показано на рис. 3.

У загальноприйнятих методиках у разі проведення досліджень напруження на обертових

деталях електричні імпульси від тензометричних мостів, що знаходяться на обертовій деталі, до тензометричної апаратури передаються за допомогою струмознімальних пристроїв з ковзаючими контактами, що нерідко спотворює характер і точність вимірювань через наявність перехідних контактних опорів. З метою спрощення вимірювальної схеми, виключення впливу перехідних контактних опорів і підвищення достовірності вимірів струмознімальний пристрій не застосовується, а вимірювальна тензометрична апаратура встановлена безпосередньо на обертовому корпусі центрифуги біля її осі, де відцентрова сила має мінімальне значення. Тензометрична апаратура з'єднується безпосередньо з тензорезисторами, закріпленими на моделі барабана, яка встановлюється у візку центрифуги з допомогою гнучкого екранованого кабеля. Управління роботою тензометричної апаратури проводиться дистанційно за періодичного візуального контролю налаштування апаратури. Отримані в результаті досліджень осцилограми зміни напружень у всіх замірних точках на барабані млина обробляються і розшифровуються за загальноприйнятою методикою.

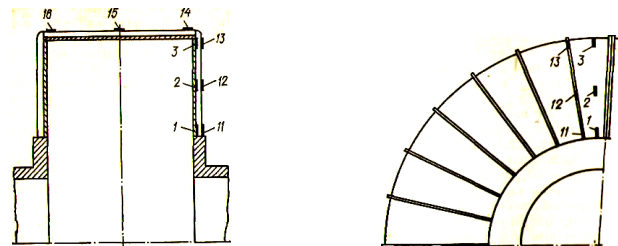


Рис. 3. Схеми розташування тензорезисторів на моделі барабана млина для досліджень у відцентровому полі (тут і на рис. 4 цифри – номери тензорезисторів)

За середнім значенням експериментальних даних будуються епюри розподілу напруг у торцевих стінках і обичайці, а також у ребрах жорсткості стінок і обичайки барабана. На підставі порівняльного аналізу епюр напружень у моделях барабанів різної конструкції робляться висновки про вплив ребер жорсткості на величину і характер розподілу напружень у різних елементах барабана, міцності і надійності барабанів різної конструкції.

Вплив типу опор підшипників (вальниці). Для проведення досліджень проектується і виго-

товляється модель барабана млина в масштабі 1:20 з дотриманням вимог геометричної і силової подібності.

Барабан обладнується двома змінними комплектами підшипників (вальниці) з різними типами опор – плоскою, жорстко закріпленою опорою основи підшипників і сферичною, рухомою, самоустановлювальною опорою.

Для визначення напружень у моделі барабана на торцевих стінках і обичайці наклеюються тензорезистори ПКБ-10-100 опором 100 Ом і базою 10 мм. Схема з'єднання тензорезисторів – напівмостова з робочим і компенсаційним тензорезисторами. Кріпляться тензорезистори ціакриновим клеєм, який дозволяє обходитися без термічної обробки.

У процесі досліджень підшипників навантаження на барабан створюється за допомогою навантажувального пристосування, що складається з п'ятитонного гідравлічного преса та спеціальної фасонної прокладки, що забезпечує рівномірний розподіл навантаження на барабан. Деформації і напруження, що виникають в елементах барабана, сприймаються тензорезисторами, фіксуються і записуються за допомогою тензометричної апаратури (рис. 4).

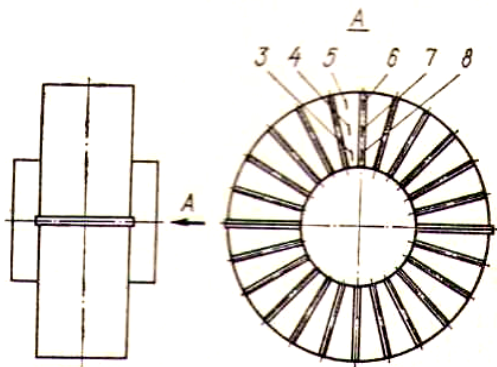


Рис. 4. Схема розташування тензорезисторів моделі барабана млина (компенсаційні тензорезистори не показані)

Дослідження проводилися за таких величин навантаження на барабан: 53, 79, 105 і 132 МН. Ці навантаження прикладалися послідовно спочатку до барабана, встановленого на підшипниках з плоскою, жорстко закріпленою опорою підстави підшипника, потім ці опори замінювалися сферичними, рухливими, самоустановлювальними. За допомогою тензометричної апаратури

фіксувалися і записувалися осцилограми напруг у всіх замірних точках на барабані за різних типів опор підшипників, оброблювалися і розшифровувалися згідно з розглянутою методикою.

За отриманими експериментальними даними будуються епюри напружень в елементах барабана млина (торцевих стінках і ребрах жорсткості). На основі порівняльного аналізу епюр напружень робляться висновки про вплив типу опор підшипників на величину і характер розподілу напружень в елементах конструкції барабана.

Вплив ребер жорсткості. Згідно з методикою, викладеною вище, досліджувався вплив ребер жорсткості на характер розподілу напружень у барабані млина.

У результаті досліджень отримані експериментальні значення напружень у всіх замірних точках моделей барабанів без ребер жорсткості і з ребрами. За середнім значенням експериментальних даних побудовані епюри розподілу напруги в торцевих стінках і обичайці барабана, а також у ребрах жорсткості стінок і обичайки (рис. 5).

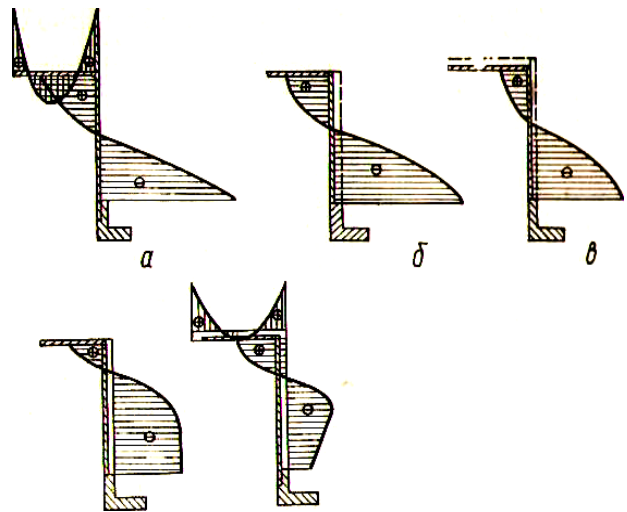


Рис. 4. Епюри розподілу напружень у радіальному перетині торцевої стінки і ребрах жорсткості моделі барабана млина різної конструкції у разі навантаження у відцентровому полі з прискоренням 20g

Як впливає з наведених епюр, максимальні напруження виникають у торцевих стінках без ребер жорсткості та обичайці (рис. 5а). По висоті стінки напруження розподіляються нерівномірно і мають тенденцію до різкого збільшення у напрямку до цапфи.

За наявності ребер жорсткості напруження на торцевій стінці знижуються майже на 20% (рис. 5б); по висоті стінки характер розподілу напружень залишається таким же, як і у стінці без ребер жорсткості. У разі установки ребер жорсткості на торцевій стінці і на обичайці барабана напруження в торцевій стінці знижуються на 35–50%, однак у перерізі біля з’єднувального фланця цапфи залишаються в 2–3 рази більшими, ніж напруження поблизу обичайки (рис. 5в). У разі установки ребер жорсткості тільки на торцевій стінці характер розподілу напружень у ребрах такий само, як і у стінці, і вони не викликають помітного перерозподілу напружень як у самій стінці, так і в ребрах, а тільки дещо знижують їх величину (рис. 5г).

Якщо ребра жорсткості установлені і на торцевій стінці, і на обичайці, то напруження в ребрах жорсткості стінки помітно зменшуються. Крім того, відбувається перерозподіл напружень по висоті ребра стінки і в бік зменшення їх величини в небезпечному перерізі – поблизу з’єднувального фланця цапфи (рис. 5д).

У ребрах обичайки характер розподілу напружень такий само, як і в обичайці без ребер жорсткості, а напруження в 1,5 раза більші, ніж у обичайки. У разі збільшення швидкості обертання центрифуги, а отже, у разі збільшення навантаження на моделі барабана млина напруження у всіх елементах барабана зростають, характер їх розподілу не змінюється. Отже, величина навантаження на барабані істотно впливає тільки на абсолютну величину напружень в елементах його конструкції, не змінюючи характеру їх розподілу.

За наведеною вище методикою досліджувався також вплив типу опор підшипників млина на напружений стан барабана млина. Результати обробки експериментальних даних зведені в таблиці 1.

За середніми значеннями експериментальних даних побудовані епюри розподілу напружень в елементах конструкції барабана за таких типів

опор підшипників – плоскою, жорстко-закріпленою, сферичною, рухомою, самоустановлювальною (рис. 6а, 6б).

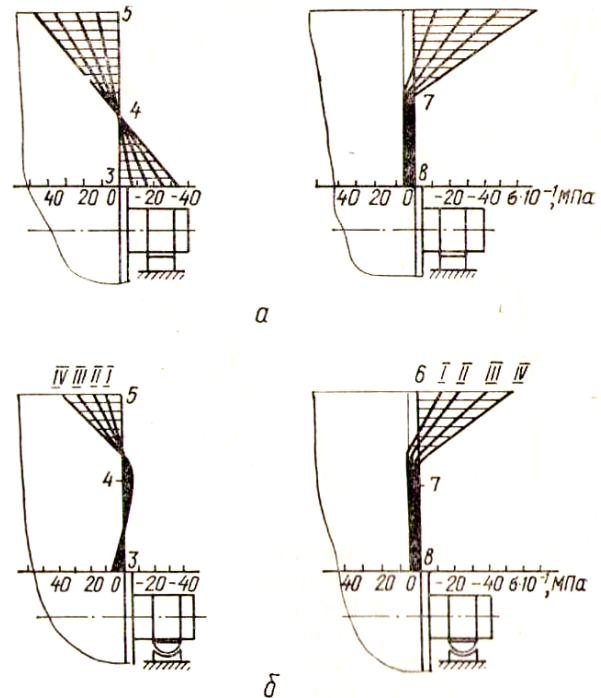


Рис. 6. Епюри розподілу напруги в торцевих стінках і ребрах жорсткості моделі барабана млина за різних типів опор підшипників: а – плоска жорстка опора; б – сферична самоустановлювальна опора: I, II, III, IV – навантаження на барабан 53, 79, 105 і 132 МН відповідно; 3–8 – номери тензорезисторів у точках виміру напруг

У результаті встановлено, що у разі прийнятої схеми навантаження барабана млина в торцевій стінці поблизу обичайки (рис. 6, точка 5) за сферичної опори підшипника напруження в 1,4 раза менше, ніж за жорсткої опори. В ребрах

Таблиця 1

Вплив конструктивних параметрів на напруження в барабані млина, МПа

| Датчик | Навантаження, МН | | | |
|--------|------------------|-----------|-----------|-----------|
| | 53 | 79,0 | 105,0 | 132,0 |
| 3 | 6,8/2,2 | 15,8/4,0 | 25,2/4,5 | 34,7/4,5 |
| 4 | 2,2/1,0 | 4,0/1,5 | 5,6/1,8 | 7,7/2,2 |
| 5 | 12,2/9,0 | 23,4/17,2 | 35,3/26,0 | 36,9/33,3 |
| 6 | 12,0/15,5 | 30,6/24,8 | 49,5/41,5 | 69,0/57,5 |
| 7 | 3,1/4,1 | 2,7/4,5 | 1,3/4,5 | 0,5/2,7 |
| 8 | 2,3/1,5 | 2,2/2,7 | 1,5/2,2 | 1,5/1,8 |

Примітки: у чисельнику наведено дані у разі жорстко закріпленої опори підшипників, у знаменнику – у разі самоустановлювальної опори.

жорсткості торцевої стінки в цій же точці напруження у разі застосування сферичної опори підшипників зменшуються в 1,3 раза порівняно з жорсткою опорою. У середній частині торцевої стінки (точка 4) напруження майже в 2 рази менше за сферичної опори, ніж за жорсткої; в ребрах напруження практично не змінюються.

Результати експерименту підтверджують, що найбільше тип опор підшипників впливає на напруження в області цапфи. Як видно з епюр, напруження в торцевій стінці біля цапфи (точка 3) у разі застосування сферичної опори зменшується майже у 6 разів порівняно з плоскою опорою. Крім того, додатковий ступінь свободи у разі самоустановлювальної опори призводить до деформації подвійного вигину торцевої стінки (рис. 6, а і б – ліва частина). Збільшення навантаження на барабан млина призводить до пропорційного збільшення напруження в торцевих стінках барабана (криві I–IV).

Висновки. Отже, на підставі результатів виконаних досліджень та аналізу впливу ребер жорсткості і типу опор підшипників на напружений стан барабана млина встановлено таке.

У разі впливу на барабан динамічних навантажень у торцевих стінках постійної товщини без ребер жорсткості виникають значні напруження знакозмінного характеру, які мають тенденцію збільшуватися до цапфи.

Посилення тільки торцевої стінки радіальними ребрами жорсткості призводить до зниження напружень у стінці на 20%, але не усуває їх нерівномірного розподілу по висоті в радіальному перерізі.

Напруження в ребрах також нерівномірно розподіляються по довжині ребра і збільшуються у напрямку до цапфи.

Підсилення барабана млина сумірними ребрами жорсткості на торцевій стінці та обичайці призводить до зниження напружень у торцевій стінці на 35–50% і зменшення концентрації напружень біля цапфи.

У ребрах відбувається перерозподіл напружень з тенденцією до зменшення в небезпечному перерізі.

Ребра обичайки суттєво не впливають на характер розподілу напруги в обичайці.

У разі збільшення навантаження на барабан напруження у всіх його елементах збільшуються.

Застосування сферичних самоустановлювальних опор підшипників барабана дозволяє суттєво знизити напруження в торцевих стінках, підвищити міцність, надійність та довговічність барабана.

Перспективним напрямом подальших досліджень є моделювання напруженого стану барабана млина самоподрібнення з допомогою програмного ресурсу SolidWorks.

ЛІТЕРАТУРА

1. Morrell S. A new autogenous and semi-autogenous mill model for scale-up, design and optimisation. *Minerals Engineering*. 2004. 17 (3). Pp. 437–445. DOI: 10.1016/j.mineng.2003.10.013.
2. Salazar J.L., Magne L., Acuña G. & Cubillos F. Dynamic modelling and simulation of semi-autogenous mills. *Minerals Engineering*. 2009. 22 (1). Pp. 70–77. DOI: 10.1016/j.mineng.2008.04.009.
3. Jabbari M. & Mohazzab A.H. Analytical Solution for Centrifugal Force Effect in Functionally Graded Hollow Sphere. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 110–116. Pp. 2829–2837. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.110–116.2829.
4. Qun Zhang Song Cen. Multiphysics Modeling: Numerical Methods and Engineering Applications. *Tsinghua University Press Computational Mechanics Series. Imprint: Academic Press*. 2015. 440 p. eBook ISBN: 9780124077379; Hardcover ISBN: 9780124077096.
5. Підготовка корисних копалин до збагачення : монографія / М.І. Сокур, В.С. Білецький, О.І. Єгурнов, О.М. Воробйов, В.О. Смирнов, Д.П. Божик. Кременчуцький національний ун-т ім. М. Остроградського, Академія гірничих наук України. Кременчук : ПП Щербатих О.В., 2017. 392 с.
6. Смирнов В.О., Білецький В.С., Шолда Р.О. Переробка корисних копалин : монографія. Донецьк : Східний видавничий дім, 2013. 600 с.
7. Смирнов В.О., Білецький В.С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин. Донецьк : Східний видавничий дім, НТШ-Донецьк, 2012. 284 с.
8. Дезінтеграція мінеральних ресурсів : монографія / М.І. Сокур, М.В. Кияновський, О.М. Воробйов, Л.М. Сокур, І.М. Сокур. Кременчук : Видавництво ПП Щербатих О.В., 2014. 304 с.
9. Потураев В.Н., Сокур М.И. Мельницы самоизмельчения. Киев : Наукова думка, 1988. 220 с.
10. Ягупов А.В., Сокур Н.И. Исследование напряжений в барабане мельницы самоизмельчения МБ-90-30 методом электротензометрирования. *Кривой Рог*, 1976.

RESEARCH OF THE STRESS STATE OF THE DRUM OF THE SELF-FINISHING MILL IN THE FIELD OF CENTRIFUGAL FORCES

Mykola Sokur

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20, Pershotravneva St., Kremenchuk, Ukraine, 39600
ORCID: 0000-0001-6779-3293

Roman Arhat

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20, Pershotravneva St., Kremenchuk, Ukraine, 39600,
 argat.rg@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9247-5297

Volodymyr Biletskyi

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2, Kyrpychova str., Kharkiv, Ukraine, 61002, ukcdb@i.ua
ORCID: 0000-0003-2936-9680

Denis Bozhyk

Private Joint-Stock Company “Suha Balka”, 5, Konstitutsiynna St., Kryvyi Rih, Ukraine, 50000
ORCID: 0000-0001-7620-7997

The purpose of this work is to obtain models of the stressed state of the drum elements of the autogenous mill using the theory of similarity and imitation of the load in the field of centrifugal forces. The method of investigation is the physical simulation of the work of the drum of a autogenous mill. At the same time, experimental studies of the stress state of the drum model of a autogenous mill are performed on a special bench consisting of a centrifuge in which the drum model is loaded. To measure stresses, tenoresistors of resistance of 100 Ohms and a base of 10 mm connected by a half-bridge scheme were used, and a set of strain gauges consisting of a power unit, an amplifier 8AN4-7m and an oscillograph N-700. Experimentally obtained stress distribution diagrams in the elements of the mill drum design, in particular, the end walls and drum shell, as well as in the ribs of wall and shell stiffness. The stress values in all the measuring points of the drum models without stiffeners and with ribs are determined. Analysis of the influence of the stiffeners and the bearing support type on the stressed state of the mill drum shows that the stress in the end wall of the mill drum is of an alternating nature and increases to a pin. The reinforcement of only the end wall by the radial stiffeners results in a reduction in stresses in the wall by 20%. The strengthening of the mill drum with commensurable stiffeners on the end wall and shell leads to a reduction of stresses in the end wall by 35–50% and a decrease in stress concentration in the trunnion. The use of spherical self-aligning bearings of the drum bearings allows to significantly reduce stresses in the end walls, to increase the strength, reliability and durability of the drum. The influence of the bearing type and the stiffeners on the nature of the distribution of stresses in the mill drum is established. The results obtained can be used to modernize and optimize the design of new autogenous mills.

Key words: autogenous mill, physical modeling, mill design, end wall and reinforcement ribs, drum bearings bearings.

REFERENCES

1. Morrell, S. (2004). A new autogenous and semi-autogenous mill model for scale-up, design and optimisation. *Minerals Engineering*. 17 (3). Pp. 437–445. DOI: 10.1016/j.mineng.2003.10.013.
2. Salazar, J.L., Magne, L., Acuña, G. & Cubillos, F. (2009). Dynamic modelling and simulation of semi-autogenous mills. *Minerals Engineering*. 22 (1). Pp. 70–77. DOI: 10.1016/j.mineng.2008.04.009.
3. Jabbari, M. & Mohazzab, A.H. (2012). Analytical Solution for Centrifugal Force Effect in Functionally Graded Hollow Sphere. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 110–116, PP. 2829–2837. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.110–116.2829.
4. Qun Zhang Song Cen. (2015). Multiphysics Modeling: Numerical Methods and Engineering Applications. *Tsinghua University Press Computational Mechanics Series*. Imprint: Academic Press. 440 P. eBook ISBN: 9780124077379; Hardcover ISBN: 9780124077096.
5. Sokur, M.I., Biletsky, V.S., Yehurnov, O.I., Vorobyov, O.M., Smyrnov, V.O., Bozhyk, D.P. (2017). Pidhotovka korysnykh kopalyn do zbahachennya: monohrafiya [Preparation of minerals for enrichment: monograph]. *Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Academy of Mining Sciences of Ukraine*. PP Shcherbatykh O.V. Kremenchuk, 392 p. [in Ukrainian].
6. Smyrnov, V.O., Biletsky, V.S., Sholda, R.O. (2013). Pererobka korysnykh kopalyn: monohrafiya [Mineral processing: monograph]. *Eastern Publishing House*. Donetsk, 600 p. [in Ukrainian].
7. Smyrnov, V.O., Biletsky, V.S. (2012). Pidhotovchi protsesy zbahachennya korysnykh kopalyn [Preparatory processes of mineral enrichment]. *Eastern Publishing House, NTSh-Donetsk*. Donetsk, 284 p. [in Ukrainian].

8. Sokur, M.I., Kiyanovskyi, M.V., Vorobyov, O.M., Sokur, L.M., Sokur, I.M. (2014). Dezintehratsiya mineral'nykh resursiv: monohrafiya [Disintegration of mineral resources: monograph]. PP Shcherbatiykh O.V. Kremenchuk, 304 p. [in Ukrainian].

9. Poturaev, V.N., Sokur, M.I. (1988). Mel'nitsy samoizmel'cheniya [Self-grinding mills]. *Naukova dumka [Scientific thought]*. Kyiv, 220 p. [in Russian].

10. Yagupov, A.V., Sokur, M.I. (1976). Issledovaniye napryazheniy v barabane mel'nitsy samoizmel'cheniya MB-90-30 metodom elektrotenzometrirovaniya [Investigation of stresses in the drum of the self-grinding mill MB-90-30 by electrostrain measurement]. Kryvyi Rih [in Russian].

Стаття надійшла 29.05.2022