

5. Технология и техника разведочного бурения / Ф.А. Шамшев, С.Н. Тараканов, Б.Б. Кудряшов и др. – М.: Недра, 1983 – 565 с.

© Ганкевич В.Ф., Кравец В.И., Ливак О.В., 2017

*Надійшла до редколегії 19.12.2017 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*

УДК 622.27:621.926.9(339.138)

М.І. СОКУР, д-р техн. наук

(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського),

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук

(Україна, Харків, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"),

Д.П. БОЖИК

(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського)

ДОСЛІДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНОЇ КОНСТРУКЦІЇ КОРПУСІВ МЛИНІВ САМОПОДРІБНЕННЯ

Постановка проблеми і стан її вивчення. З останньої третини ХХ ст. самоподрібнення є найбільш прогресивною технологією рудопідготовки у вітчизняній та іноземній практиці. За станом на 2010 рік в зарубіжній гірничій промисловості знаходилось в експлуатації близько 160 великих млинів повного чи часткового самоподрібнення, у тому числі 65 з них працювали в залізорудній промисловості, 28 – у мідній, а інші – при збагаченні руди рідкісних і благородних металів. У порівнянні з подрібненням у стержневих і кульових млинах самоподрібнення характеризується рядом переваг: – виключаються стадії середнього і дрібного дроблення; – економія подрібнюючих тіл (не застосовуються кулі і стержні); – відсутнє забруднення подрібненого матеріалу металом; – поліпшення технологічних показників подальшого збагачення внаслідок кращого розкриття і меншого шламоутворення; – при переробці золотовмісних руд з наступним ціануванням виключаються втрати золота з залізним скрапом і крихтою, знижується витрата ціаніду і поліпшуються умови праці на кварцових і силікозонебезпечних рудах; – при флотації молібденових руд використання млинів самоподрібнення покращує показники збагачення, що пов'язано з меншим "назалізненням" лусочок молібденіту. [1-10].

Мета статті – дослідження напруженого стану барабанів млинів самоподрібнення з традиційними і посиленними торцевими стінками.

Виклад основного матеріалу

Млин МБ-90-30. На підставі досліджень напруженого стану барабана млинів в лабораторних і промислових умовах і розробленого наукового авторського підходу до конструкції барабанів великих млинів було модернізовано бара-

бан млина МБ-90-30 з метою підвищення його міцності і надійності. Торцеві стінки були посилені литими ребрами жорсткості з додатковими полками збільшуючої до цапфи ширини (рис. 1).

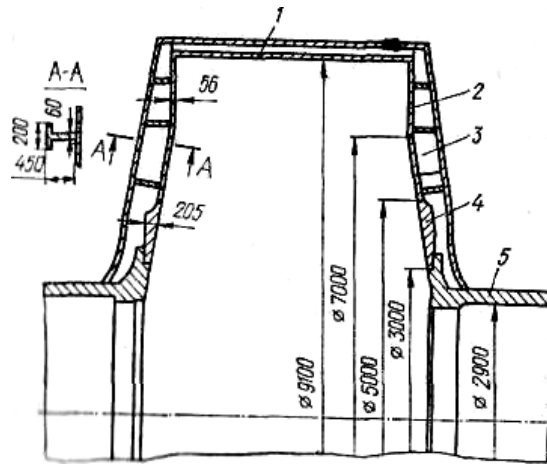


Рис. 1. Схема модернізованого барабана млина МБ-90-30 з тавровими ребрами жорсткості:
1 – обичайка барабана, 2 – торцева стінка; 3 – ребра жорсткості;
4 – фланець; 5 – цапфа

Ребра жорсткості таврового перерізу були виконані і на обичайці барабана. Крім того, при проведенні зварювальних робіт на барабані виконано комплекс заходів по зняттю залишкової напруги. У місцях імовірної максимальної напруги на торцевій стінці, обичайці, ребрі жорсткості наклеювалась розетка з трьох тензорезисторів розташованих під кутом 45° один від одного. Схема розташування тензорезисторів на модернізованому барабані показана на рис. 2, схема наклеювання тензорезисторів на ребрі жорсткості для детального дослідження його напруженого стану – на рис. 3.

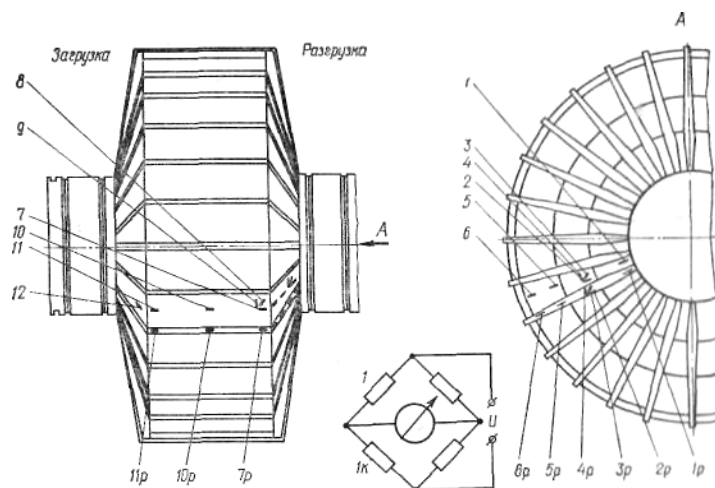


Рис. 2. Схема розташування тензорезисторів на модернізованому барабані млина самоподрібнення:
внизу – схема з'єднання тензорезисторів у мості;
цифри – центри тензорезисторів

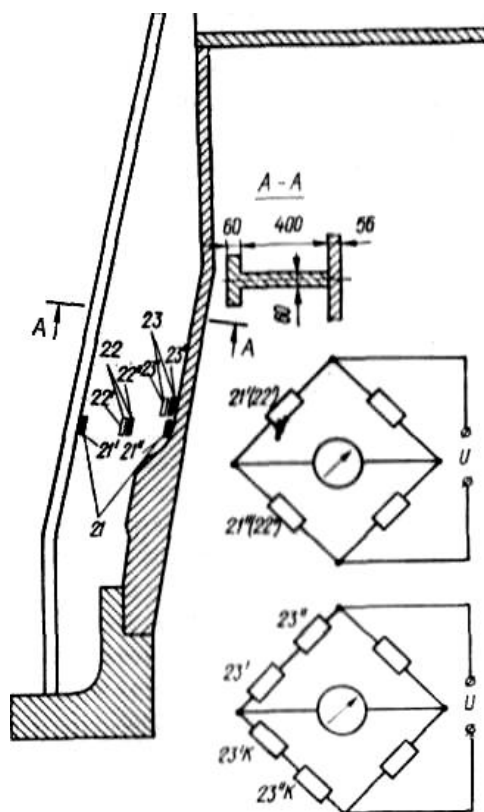


Рис. 3. Схема розташування тензорезисторів в площині ребра жорсткості барабана:
 праворуч – схеми з'єднання тензорезисторів в мости;
 цифри – номери тензорезисторів (компенсаційні тензорезистори не показані)

За даними проведених досліджень записані осцилограми зміни напруги в елементах конструкції барабана, при розшифровці яких отримані фактичні значення напруги в усіх точках вимірів на барабані млина (таблиця 1) а також побудовані епюри напруги в торцевій стінці, обичайці і ребрах жорсткості барабана при різних режимах її роботи (рис. 4 і 5).

Таблиця 1

Результати дослідження напруженого стану модернізованого барабана млина МБ-90-30 з тавровими ребрами жорсткості в промислових умовах

Місце вимірювання напруги	Тензорезистор	Середні напруження ($\times 10^{-1}$), МПа	Середньо-квадратичне відхилення ($\times 10^{-1}$), МПа	Коефіцієнт варіації, %
1	2	3	4	5
Торцева стінка барабана	1	78,0/67,0	3,0/4,5	3,9/6,7
	2	69,5/56,0	1,4/7,5	2,0/1:3,5
	3	42,0/54,0	3,0/7,6	7,2/14,0
	4	44,0/54,2	9,2/3,2	22,0/60,0
	5	36,5/36,5	7,7/1,8	28,0/5,0
	6	54,4/55,2	2,8/7,0	5,2/12,7
Обичайка барабана	7	71,5/68,0	12,9/5,6	18,1/8,2
	8	55,2/55,2	7,3/7,3	14,0/13,2
	9	53,4/59,8	8,3/9,2	15,0/15,0
	10	12,0/18,0	1,0/2,0	8,3/11,1
	11	80,0/92,0	1,7/2,3	2,1/2,5

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
Ребра жорсткості:				
торцевої стінки по довжині ребра	1р	284,0/316,0	14,0/5,9	5,0/1,8
	2р	102,0/91,0	7,0/9,2	7,0/10,0
	3р	54,2/73,0	8,7/7,0	16,0/10,0
	4р	82,0/48,0	4,3/4,0	5,3/4,8
	6р	70,0/101,0	4,2/6,7	6,0/6,6
	7р	103,0/130,8	10,9/6,2	10,5/4,5
	обичайки по довжині ребра	10р	25,0/32,0	2,0/3,0
11р		142,3/157,5	7,5/4,6	5,2/2,9
21		60,5/71,3	3,0/5,0	5,0/7,0
торцевої стінки по висоті ребра в небезпечному перетині	22	72,0/72,0	6,3/6,3	8,9/8,9
	23	74,0/81,0	14,5/18,2	19,0/22,4

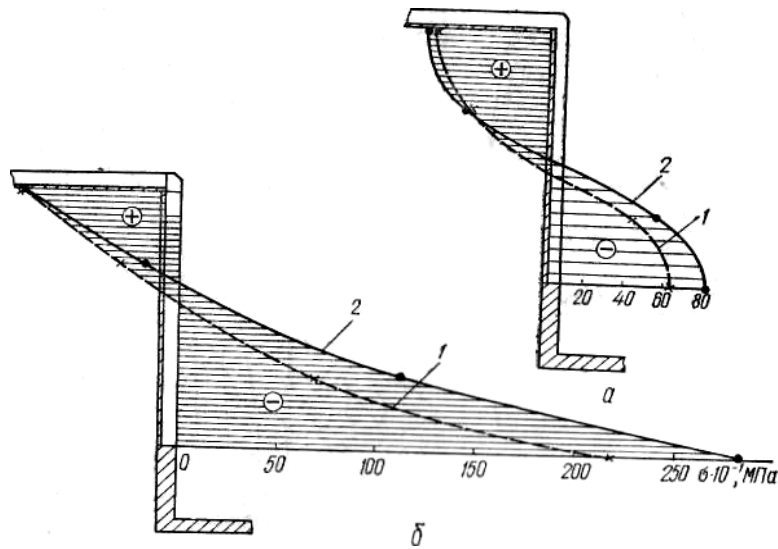


Рис. 4. Епюри напружень в корпусі барабана млина при різних ступенях заповнення барабана рудою: а – в торцевих стінках барабана; б – в ребрах жорсткості; 1 – $\varphi = 0,2$; 2 – $\varphi = 0,5$

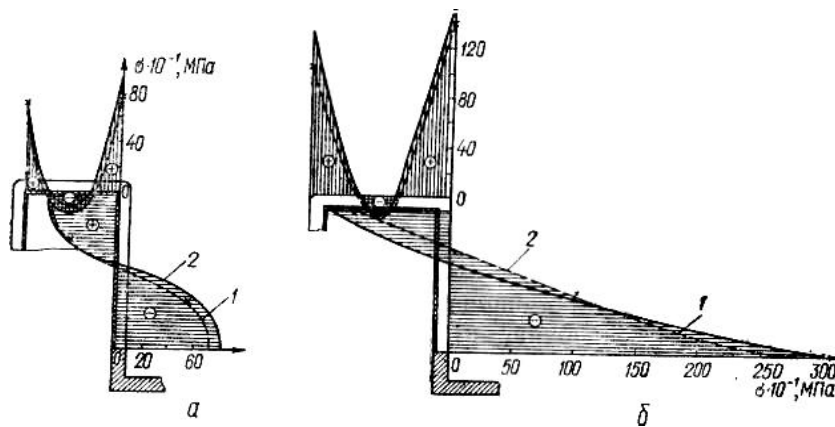


Рис. 5. Епюри розподілу напруження в елементах корпусу барабана млина при різних режимах його роботи: а – в торцевих стінках і обичайці; б – в ребрах жорсткості; 1 – $n = 2 \text{ хв}^{-1}$; 2 – $n = 11 \text{ хв}^{-1}$

Крім того, в результаті детальних тензометричних досліджень за спеціальною вимірювальною схемою (рис. 3) напруженого стану ребра жорсткості в небезпечному перетині встановлено, що напруження вигину в вертикальній площині складають 8,0 МПа, та в горизонтальній площині (в площині ребра) – 3,8 МПа. Напруження для зусиль розтягу не перевищують 4,2 – 4,6 МПа.

З аналізу результатів експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

- характер змін напружень при кожному оберті барабана та характер їх розподілу в елементах конструкції модернізованого барабана млина с торцевими ребрами жорсткості залишились приблизно такими ж, як й в барабані з плоскими ребрами жорсткості;

- модернізація барабана шляхом використання ребер жорсткості з додатковими полками змінної ширини по відношенню до барабану з плоскими ребрами дозволила підвищити поздовжню стійкість ребер жорсткості та більш рівномірно розподілити напруження по висоті торцевих стінок, зменшити в 2–3 рази напруження в торцевих стінках барабана та в 1,5-2 рази – напруження в ребрах жорсткості (по довжині ребер), зменшити напруження по висоті ребра в небезпечному перетині (де відбувалась максимальна кількість відмов) торцевій стінці барабана (напруження вигину в горизонтальній площині – в 3,5 рази, напруження розтягування – стискування – в 9 разів);

- ребра жорсткості несуть основне навантаження, отже, модернізований барабан являє собою реброву конструкцію у якій оболонка несе незначне навантаження і з точки зору міцності відіграє другорядну роль;

- напруження в елементах конструкції барабана залежать від ступеня заповнення його рудою і зростають на 20-25% при збільшенні ступеня заповнення від 0 до 50%;

- збільшення частоти обертання барабана від 2 до 11 хв⁻¹ призводить до збільшення напруження в елементах його конструкції на 6-10%.

Таким чином, на підставі результатів досліджень була створена і реалізована в промислових умовах конструкція барабана млина з ребрами жорсткості з додатковими полицями на вільних кінцях таврового перерізу. Тривала експлуатація і випробування в промислових умовах підтвердили високу надійність і працездатність ребрової конструкції барабана, можливість її застосування при створенні барабанів млинів великої одиничної потужності тому технічне рішення було рекомендовано як один з варіантів конструкції барабана створюваного найбільшого вітчизняного млина ММС-105-50 діаметром 10,5 м і продуктивністю 5 млн т на рік.

Для перевірки ефективності і оцінки надійності нової конструкції барабана були проведені збір, обробка і аналіз статистичних експлуатаційних даних про надійність млина із старою і новою конструкцією барабана. Побудовані гістограми розподілів простоїв при роботі із заводською і вдосконаленою конструкцією барабана млина. Встановлено, що після модернізації барабана простої секції внаслідок відмов млина зменшилися на 22%, що підтверджує ефективність впровадження заходів по вдосконаленню конструкції барабана.

Млин ММС-90-30А. З використанням результатів дослідження і розроблених рекомендацій на СТЗ була виготовлена дослідно-промислова партія млинів ММС-90-30 А, зокрема, 8 млинів експлуатуються на збагачувальній фабриці. Торцеві стінки барабана млина ММС-90-30А були виконані змінними за товщиною – вона збільшується у напрямку до цапфи, з невисокими ребрами жорсткості, що відливаються спільно із стінкою (рис. 6). Обичайка барабана також була виконана змінною, що збільшується від центральної частини до торцевих стінок (товщина центральної частини – 56, біля торцевої стінки – 80 мм). Мри цьому на обичайці також встановлені ребра жорсткості що примикають до відповідних ребер жорсткості торцевих стінок.

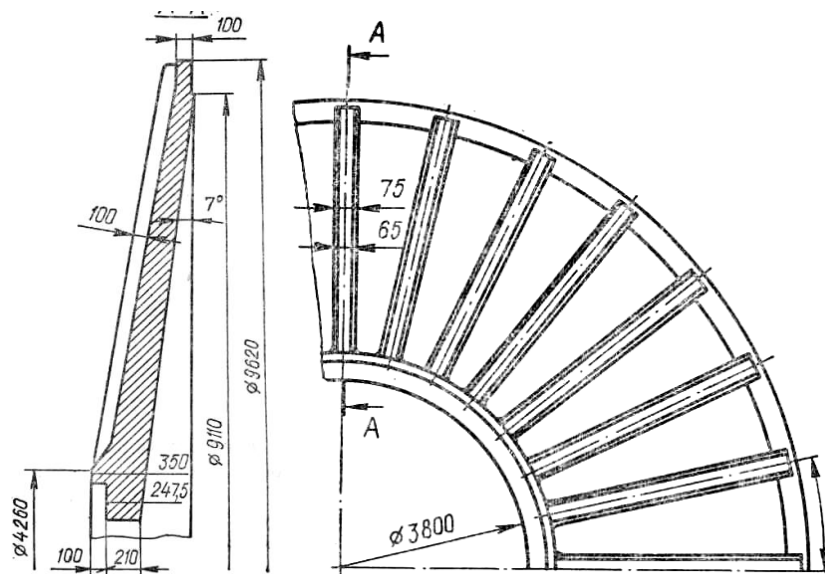


Рис. 6. Конструкція литої торцевої стінки барабана млина ММС-90-30А

З метою експериментальної перевірки ефективності і надійності такої конструкції барабана були проведені експериментальні дослідження напруженого стану барабана млина ММС-90-30А в промислових умовах. Встановлено що напруження в торцевих стінках знаходиться в межах 12,5-17,5 МПа, у ребрах жорсткості – 25-30 МПа, а обичайці – 15-17 МПа. Максимальні напруження від динамічного навантаження в торцевих стінках по перевищують 23 МПа, а в ребрах жорсткості торцевих стінок – 21 МПа. У обичайці барабана напруження досягають 12,5, в ребрах жорсткості обичайки – 9,5 МПа.

Таким чином, промислові випробування барабана млина описаної конструкції з торцевими стінками змінної товщини підтвердили, що напруження в елементах конструкції барабана знаходяться в допустимих межах – 25-30 МПа і барабан має достатню міцність та надійність.

Млин ММС-70-23. З урахуванням встановлених в результаті досліджень закономірностей розподілу напружень була змінена конструкція торцевих стінок барабана млина ММС-70-23. Удосконалення конструкції полягали в тому що на торцевій стінці був усунений небезпечний концентратор напруги – ступінчатий перехід від кільцевого фланця стінки завтовшки 140 мм до стінки за-

втовшки 56 мм. Замість ступінчастого здійснений плавний перехід при цьому зварювальний шов виконаний на більшому діаметрі в місці зниженого напруження. Крім того, при проведенні зварювальних робіт на барабані був застосований комплекс заходів по зняттю залишкового напруження.

Партія млинів з вдосконаленою конструкцією барабана була виготовлена на СТЗ і встановлена на збагачувальній фабриці ІнГЗК. Перевірка в промислових умовах підтвердила ефективність запропонованих заходів по підвищенню надійності барабана млина ММС-70-23. Простої млина внаслідок відмов барабана зменшилися на 235 год. на рік завдяки чому збільшено виробництво концентрату на 9975 т в рік і отриманий істотний економічний ефект. Крім того, по аналогії з млином ММС-90-30А були розроблені робочі креслення і розпочато виготовлення млинів ММС-70-23 з описаною конструкцією барабанів, торцеві стінки яких також виконані змінної товщини, що збільшується в напрямку до цапфи (рис. 7). В порівнянні із старою конструкцією барабанів така конструкція володіє підвищеною міцністю і надійністю, дозволяє довантажувати у барабан кулі у кількості 10-15%, що підвищує їх продуктивність.

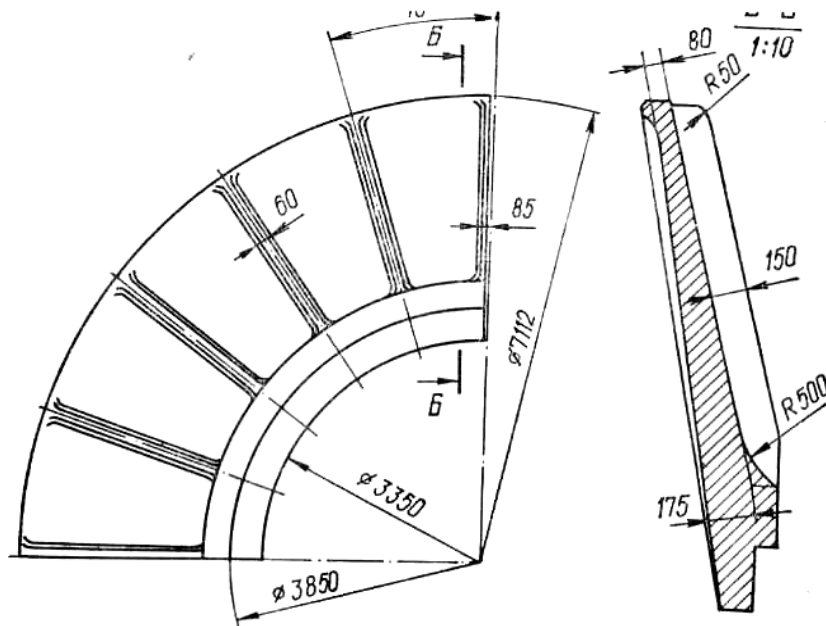


Рис. 7. Конструкція торцевої стінки вдосконаленої конструкції барабана млина ММС-70-23

Млин ММС-105-50. З використанням результатів досліджень Механобрчерметом були видані початкові дані і спільно із СТЗ розроблено технічне завдання на млин ММС-105-50 продуктивністю 700 т/год з потужністю приводу 10000 кВт. Розроблено три варіанти конструкції барабана. По першому варіанту барабан має торцеві стінки, посилені ребрами жорсткості змінної висоти таврового перерізу які разом із стінкою несуть основне навантаження (рис. 8, а).

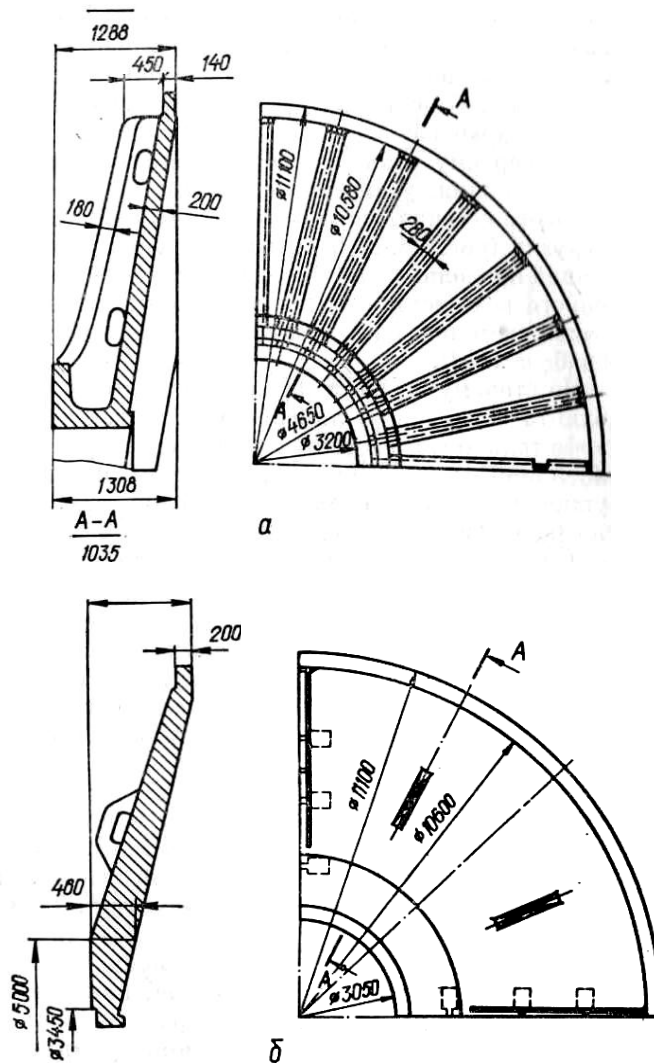


Рис. 8. Конструкція стінок барабана млина ММС-105-50 з ребрами жорсткості таврового перерізу змінної висоти (а) і змінної товщини за лінійним законом (б)

Така конструкція володіє підвищеною подовжньою стійкістю і жорсткістю в умовах одночасної дії крутного і вигинного моментів що в кінцевому рахунку дозволяє досягти достатньої міцності і надійності барабана.

По другому варіанту торцеві стінки барабана виконані змінної, товщини, що лінійно збільшується у напрямку до цапфи, вони несуть основне навантаження (рис. 8, б). Така конструкція торцевих стінок дозволяє підвищити міцність барабана за рахунок більш рівномірного розподілу напружень по висоті стінки. Відповідно до характеру розподілу напружень торцеві стінки барабана млина ММС-105-50 пропонується виконувати змінної товщини, що змінюється по параболічному закону і описується рівнянням $\delta = kx^2$, де δ – товщина стінки; x – змінна, рівна відношенню максимального діаметру стінки до діаметру перерізу, що розраховується; k – коефіцієнт, залежний від діаметру торцевої стінки і механічних властивостей її матеріалу: для млинів діаметром 7,9 і 10,5 м рекомендується приймати в межах 0,008-0,01D (у метрах). Форма і розміри торцевої стінки барабана млина ММС-105-50, розраховані по запропонованій формулі, показані на рис. 9. Для порівняння наведені форма і розміри торцевої стінки барабана млина ММС-90-30А запропонованої конструкції.

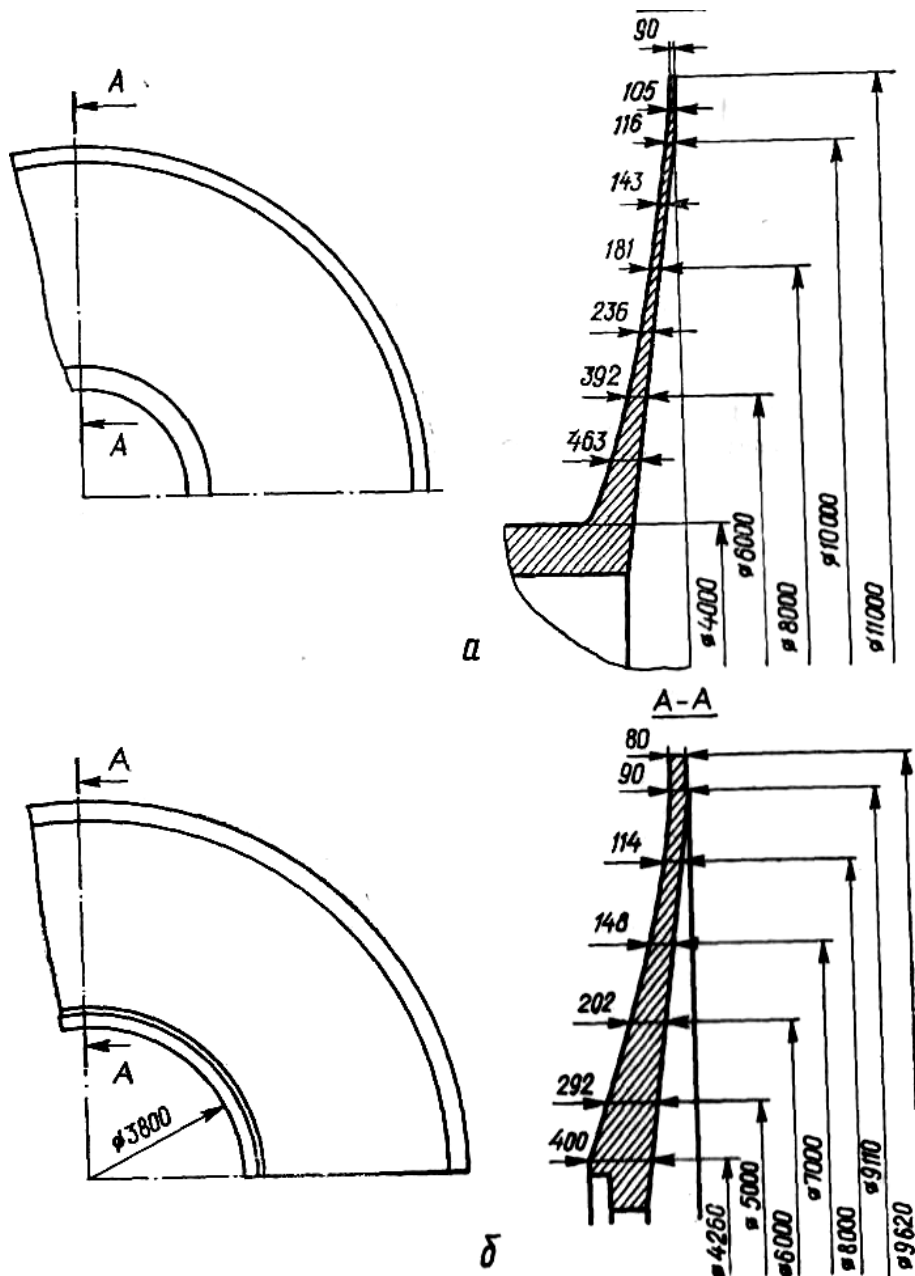


Рис. 9. Конструкції рівномірних торцевих стінок змінної, що змінюється по параболічному закону товщини:
 а – стосовно до створюваного млину;
 б – для удосконалення конструкції барабана млина ММС-90-30А

Для перевірки ефективності запропонованого технічного рішення розрахована і виготовлена модель барабана млина ММС-90-30А з такою конструкцією торцевих стінок в масштабі 1:20 і проведені порівняльні випробування напруженого стану барабана з торцевими стінками постійної і змінної товщини. Встановлено, що напруження у барабані з торцевими стінками постійної товщини розподіляються нерівномірно по висоті стінки і досягають максимального значення біля цапфи. Напруження в торцевій стінці змінної товщини значно менші і більш рівномірно розподілені по висоті торцевої стінки. Отже, барабан млина з торцевими стінками змінної товщини, що змінюється за параболічним законом, є рівномірною і надійною конструкцією.

Висновки

1. Описані інноваційні технічні рішення успішно впроваджені на млинах МБ-90-30, ММС-70-23, ММС-90-30А, ММС-105-50 і рекомендовані до використання при розробці млинів інших типорозмірів.

2. Отримані епюри напружень в корпусі барабана млина при різних ступенях заповнення барабана рудою, а також епюри розподілу напруження в елементах корпусу барабана млина при різних режимах його роботи.

3. Показано, що барабан млина з торцевими стінками змінної товщини, що збільшується до цапфи, є найбільш раціональною конструкцією, що дозволяє отримати рівномірну картину напружень на елементи барабана. Рекомендовано барабан млина з торцевими стінками змінної товщини, що змінюється за параболічним законом, а також торцеві стінки барабана виконані змінної товщини, що лінійно збільшується у напрямку до цапфи.

4. На підставі результатів досліджень була створена і реалізована в промислових умовах конструкція барабана млина з ребрами жорсткості з додатковими полицями на вільних кінцях таврового перерізу.

Список літератури

1. Сокур Н.И., Калиниченко А.Ф. Новая конструкция футеровки мельниц самоизмельчения // Цв. металлургия. – 1983. – № 3. – С. 19-21.
2. Підготовка корисних копалин до збагачення: монографія / Сокур М.І., Білецький В.С., Єгурнов О.І., та ін. – Кременчук: Кременчуцький національний ун-т ім. М. Остроградського, Академія гірничих наук України. ПП Щербатих О.В., 2017. – 392 с.
3. Ягупов А.В., Сокур Н.И. Исследование напряжений в барабане мельницы самоизмельчения МБ-90-30 методом электротензометрирования. – Кривой Рог, 1976. – 5 е. – Деп. в Черметинформ. 27.09.76; № 97-76 Деп.
4. Смирнов В.О., Білецький В.С., Шолда Р.О. Переробка корисних копалин: Монографія. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. – 600 с.
5. Потураев В.Н., Сокур М.И. Мельницы самоизмельчения. – К.: Наук. думка, 1988. – 220 с.
6. Сокур М.І. Кияновський М.В., Воробйов О.М., Сокур Л.М., Сокур І.М. Дезінтеграція мінеральних ресурсів: Монографія. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2014 – 304 с.
7. Mechanisms in the autogenous mill and their mathematical representation by G. G. STANLEY, B.Sc. (Eng.) (Wits.), M.E. (Queensland), Ph.D., (Fellow) // JOURNAL OF THE SOUTH AFRICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY. NOVEMBER 1974. P. 77-99.
8. S. Morrell. A new autogenous and semi-autogenous mill model for scale-up, design and optimization. March 2004. Minerals Engineering 17(3):437-445. DOI 10.1016/j.mineng.2003.10.013
9. Сергєєв П.В., Білецький В.С. Селективна флокуляція вугільних шламів органічними реагентами: Монографія. – Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, "Редакція гірничої енциклопедії", 2010. – 240 с.
10. Salazar, J.L., Magne, L., Acuña, G., & Cubillos, F. (2009). Dynamic modelling and simulation of semi-autogenous mills. Minerals Engineering, 22(1), 70-77. DOI: 10.1016/j.mineng.2008.04.009.

© Сокур М.І., Білецький В.С., Божик Д.П., 2017

Надійшла до редколегії 18.11.2017 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим