

10. Пат. 110443 Україна, МПК E21B 10/46, E21B 7/14. Термомеханічний породоруйнуючий інструмент / Дреус А.Ю., Кожевников А.О., Судаков А.К., Вахалін Ю.М. / № u 2016 03522; заявл. 04.04.16; опубл.10.10.16, Бюл. №19.

В.Ф. Ганкевич В.Ф., Ливак О.В., 2017

*Надійшла до редколегії 06.11.2017
Рекомендовано до публікації д.т.н. Васильйовим Л.М.*

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)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БАРАБАНА МЛИНА САМОПОДРІБНЕННЯ В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

Постановка проблеми і стан її дослідження. Проблема дослідження 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] на платформі графічного програмування MATLAB / SIMULINK успішно розроблено динамічну модель процесу напівсамоподрібнення руди. Модель протестовано та перевірено на продуктивності самоподрібнення 1800 т/год в промислових умовах при подрібненні мідної руди.

По-друге, проблемою є моделювання умов роботи конструктивних елементів млинів самоподрібнення. Для дослідження напруженого стану конструкцій прийнято використовувати імітації навантаження в полі відцентрових сил [3, 4].

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 обумовлює необхідність додаткових досліджень. Актуальність дослідження напруженого стану конструкцій млина, зокрема, в промислових умовах, показана також в роботах [6-9].

Мета статті – експериментальні дослідження напруженого стану моделі барабана млина самоподрібнення в промислових умовах.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводились на дослідно-промисловому зразку млина МБ-90-30 з метою установлення причин відмов

(руйнувань) барабана і розробки рекомендацій щодо підвищення його міцності і надійності, а також для промислової перевірки закономірностей, встановлених в лабораторних умовах. Випробування велися на дослідній секції збагачувальної фабрики ІнГЗК. Замірялися залишкові напруження, що виникають в конструкції в результаті проведення великого обсягу зварних робіт на змонтованому і встановленому в підшипники барабані, а також напружень від динамічних навантажень, що діють на барабан (рис. 1).

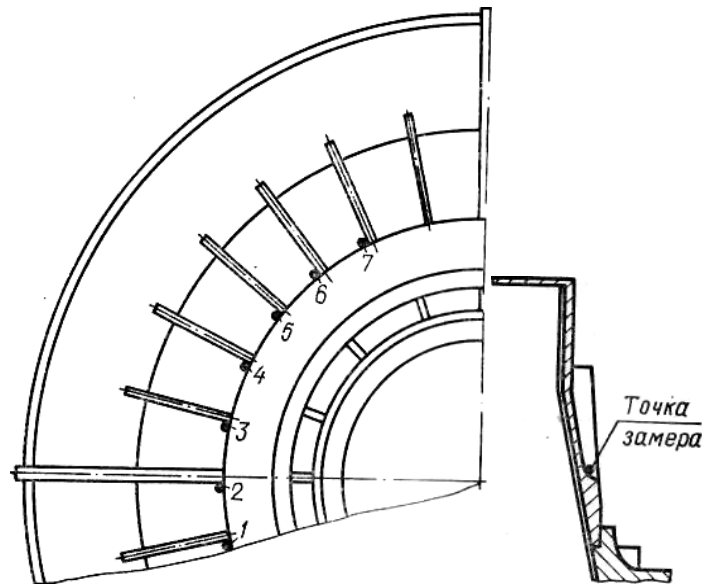


Рис. 1. Схема розміщення точок виміру остаточного напруження в зварювальних швах ребер жорсткості барабана млина:
1-7 – номери точок вимірів

Виміри проводилися за допомогою магнітопружного тестера Максимова принцип дії якого заснований на зміні магнітною проникливості металу при виникненні напруженого стану.

На першому етапі досліджень напруженого стану барабана залишкова напруження замірялася в місцях яскраво виражених концентраторів напруження – біля зварних швів ребер жорсткості і в місці приварювання стінки завтовшки 56 мм до кільцевого фланця завтовшки 205 мм. Місця установки датчиків ретельно захищалися від корозії і раковин.

На другому етапі досліджень замірялися напруження в зварних швах ребер жорсткості після посилення їх додатковими косинками в місцях концентрації напружень. Напруження замірялася по усій довжині зварних швів ребер жорсткості і по висоті ребер (рис. 1), повторюючись в кожній точці 3-5 разів. При обробці експериментальних даних визначалися середні значення залишкового напруження, коефіцієнти варіації і середні квадратичні відхилення.

Напруження, що виникає в елементах конструкції барабана від динамічних навантажень, вивчалися за допомогою тензометрування за спеціально розробленою методикою [10] при зміні міри заповнення барабана в межах $10\% \leq \varphi \leq 50\%$ і частоті обертання $0 < n < 12 \text{ хв}^{-1}$.

Для вимірювання напружень застосовуються дротяні тензорезистори оміч-

ного опору ПКБ-20-200. Схема включення тензорезисторів – напівмостова з одним робочим і одним компенсаційним тензорезисторами. У кожній точці виміру на торцевих стінках і обичайці барабана наклеювалися розетка з двох робочих тензорезисторів – один в радіальному, інший в тангенціальному напрямках. Кут між осями тензорезисторів 90° . На ребрах барабана тензорезистори наклеювалися тільки в радіальному напрямі (рис. 2).

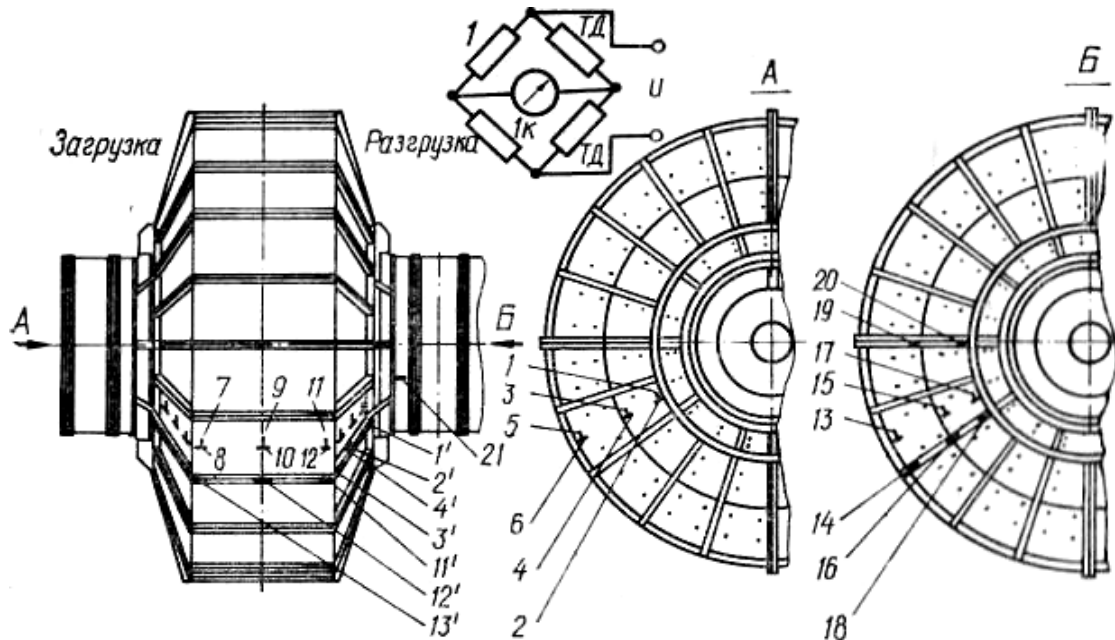


Рис. 2. Схема розташування тензорезисторів на торцевій стінці і обичайці барабана: 1-21 – номери тензорезисторів; вгорі показана схема з'єднанні тензорезисторів у мості

Тензорезистори на барабані млина кріпилися методом точкового приварювання пластинок завтовшки 0,1 мм з наклеєними на них датчиками. На пластинки тензорезисторів наклеювалися з допомогою клею БФ-2 і проходили спеціальну термічну обробку. До корпусу барабана пластинки кріпилися за допомогою електрозварювання. Компенсаційні тензорезистори кріпилися на окремих панелях не пов'язаних жорстко з барабаном, що виключало вплив деформації барабану.

При проведенні досліджень застосовувалися шлейфовий осцилограф Н-700 і тензометричний підсилювач 8АНА-7м. Вся вимірювальна мережа монтувалася за допомогою гнучких екранованих дротів типу ПМВГЕ-0,5, що виключало утворення наведених струмів. Оскільки вимірювальні тензометричні мости знаходилися на обертовому барабані млина, з'єднання їх з тензометричною апаратурою здійснювалося за допомогою гнучкого екранованого кабелю, прокладеного в спеціальній трубі змонтованого усередині барабана і бутари млина. Прийнята схема дозволяла обійтися без струмомірача, що підвищувало точність і достовірність вимірів завдяки відсутності перехідних контактних опорів.

Гідроізоляція тензорезисторів і захист їх від механічних ушкоджень здійснювалися за допомогою спеціального швидкотвердіючого складу, що включає 75% епоксидної смоли ЕД-6, 20% отверджувача – поліетиламіну і 5% пластифікатора – дибутил-фтолату.

Напруження у барабані МБ-90-30 замірялися при різних ступенях заповнення барабана рудою (від 0 до 0,5) і різних швидкостях його обертання. По середніх значеннях напружень в точках вимірів, отриманих в результаті розшифровки осцилограми будувалися епюри розподілу напружень в торцевих стінках і обичайці барабана. Таким чином визначалися фактичні сумарні напруження в точках вимірів барабана в радіальному і тангенціальному напрямках, характер їх розподілу. Для детальнішого дослідження величини і характеру розподілу напружень в найбільш небезпечному перерізі – на ребрі жорсткості барабана – монтувалися три групи тензومترчних мостів за спеціальними схемами. Перша група з'єднувалася за напівмостовою схемою, причому робочі тензорезистори наклеювалися на протилежні площини ребра паралельно один одному. Така схема дозволяла заміряти тільки напруження у від вигину в площині ребра. Друга група що з'єднувалася за такою ж схемою, дозволяла заміряти тільки напруження вигину в площині, перпендикулярній до торцевої стінки барабану. Третя група тензорезисторів дозволяла заміряти сумарні напруження вигину і розтягування в площині ребра. Для визначення напруження тільки від розтягуючих зусиль геометрично складалися осцилограми напруження – сумарних (що вигинають і розтягують) і таких, що тільки вигинають. Осцилограми розшифровувалися за загальноприйнятою методикою. На основі аналізу отриманих значень напруження робилися висновки про напружений стан барабана млина в цілому, а також про величини і напрям дії навантажень в ребрах жорсткості.

Згідно з методикою, викладеною вище, експериментально була визначено фактичні залишкові напруження в місцях концентрації напруження і в зварних швах ребер жорсткості барабана млина МБ-90-30 (табл. 1).

Таблиця 1

Залишкові напруження у барабані млина МБ-90-30

Замірні точки	Середні напруження, МПа		Середні квадратичні відхилення, МПа		Коефіцієнт варіації, %	
	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
1	175	105	10,5	8,3	0,60	0,79
2	240	250	14,2	16,5	0,57	0,66
3	182	210	15,0	12,5	0,83	0,60
4	170	120	7,4	7,8	0,48	0,71
5	175	105	12,8	11,2	0,73	1,07
6	140	140	9,5	12,4	0,68	0,89
7	170	108	8,2	14,2	0,51	1,12
8	180	120	17,4	17,2	0,98	1,43
9	–	240	–	22,4	–	0,93
10	–	400	–	45,2	–	0,65
11	–	350	–	42,0	–	0,76

Примітки: σ_1 – напруження в місцях концентрації; σ_2 – напруження у зварному шві ребер жорсткості.

Аналіз даних таблиці показує, що при прийнятій конструкції і технології виготовлення барабана дослідницько-промислового зразка млина МБ-90-30, що передбачає установку ребер жорсткості і виробництво великого обсягу зварних

робіт на вже змонтованому барабані у ньому виникають значні залишкові напруження – в основному більше 100 МПа. Такі напруження при одночасній дії динамічних навантажень можуть стати причиною тріщиноутворення і руйнування барабана.

Істотним конструктивним недоліком барабана є різкий перехід на торцевій стінки від товщини 205 мм до товщини 56 мм, приварка ребра жорсткості в цьому місці. Такий перехід є небезпечним концентратором напруження, що досягає в точках вимірів 180 МПа.

У зварних швах ребер жорсткості залишкові напруження також високі – до 250 МПа, що, очевидно, є результатом відсутності заходів по зняттю залишкового напруження при виробництві зварних робіт на барабані млина.

Експериментально були визначені також величини, характер зміни і розподілу напруження від динамічних навантажень в усіх елементах конструкції дослідно-промислового зразка млина МБ-90-30. Отримані характерні осцилограми зміни максимального напруження в усіх точках вимірів при ступені заповнення барабана рудою $\varphi = 0,50$ і частоті його обертання $n = 12 \text{ хв}^{-1}$.

Шляхом розшифровки осцилограм за наведеною вище методикою були визначені величини напруження і характер їх зміни в процесі обертання барабана (табл. 2). Поле напружень барабана наведені у вигляді кругових епюр, виконаних в певному масштабі (рис. 3).

Таблиця 2

Результати дослідження напруженого стану барабана млина МБ-90-30 в промислових умовах

Місце вимірювання	Тензорезистор	Середнє значення напруження, МПа	Середньоквадратичне відхилення, МПа	Коефіцієнт варіації, %
1	2	3	4	5
Торцева стінка барабана з боку загрузки	1	4,5	0,5	1,1
	2	13,0	1,2	0,9
	3	6,0	0,5	0,8
	4	12,5	1,0	0,8
	5	4,0	0,8	1,0
	6	22,0	2,1	0,9
Обичайка барабана	7	11,0	1,8	1,1
	8	19,0	1,6	0,8
	9	9,0	0,1	1,1
	10	12,0	0,8	0,8
	11	18,0	1,1	0,7
	12	95,0	6,1	0,6
Торцева стінка з боку розвантаження	13	7,5	1,0	1,3
	14	15,0	1,2	0,8
	15	7,5	0,5	0,0
	16	12,0	1,1	0,9
	17	50,0	4,2	0,8
	18	20,0	1,8	0,9
З'єднувальний фланець з боку розвантаження	19	32,5	2,4	0,7
	20	67,0	3,5	0,5

1	2	3	4	5
Цапфа з боку розвантаження	21	12,0	1,5	1,2
Ребро жорсткості				
торцевої стінки по довжині ребра	1'	50,0	8,0	1,6
	2'	42,0	5,5	1,3
	3'	45,5	4,5	1,2
	4'	48,5	4,5	1,1
обичайки по довжині ребра	11'	65,0	4,5	6,0
	12'	24,0	3,5	1,4
	13'	28,0	4,5	1,6
торцевої стінки по висоті ребра в небезпечному перетині	5	15,0	2,5	1,6
	6	19,5	2,3	1,7
	7	54,0	3,5	0,6
	8	19,5	1,5	1,4

Як впливає з осцилограм і кругових епюр напружень в процесі роботи млина в елементах конструкції її барабана виникають значні динамічні напруження знакозмінного характеру з майже симетричним циклом. Величини цих напружень залежать від ступеня заповнення барабана рудою, частоти його обертання і зростають зі збільшенням цих параметрів.

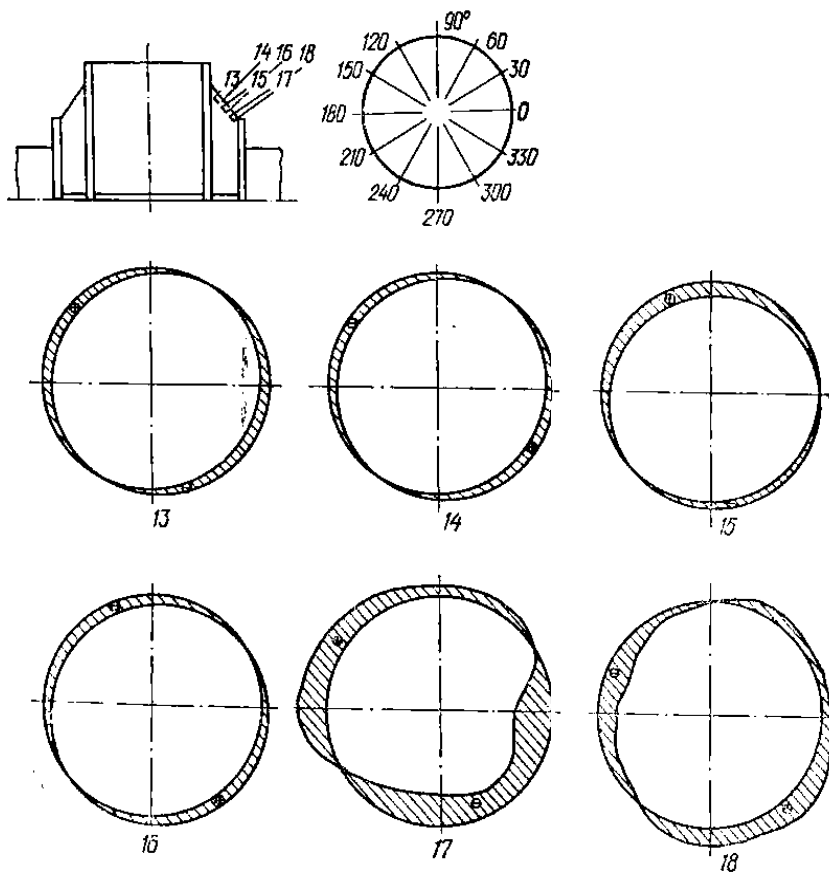


Рис. 3. Кругові епюри зміни напруження в точках вимірів торцевої стінки барабана за кожен цикл (обертів) барабана млина: 13-18 – номери тензорезисторів

За середнім значенням максимальних величин напружень в замірних точках побудовані також епюри напружень в торцевих стінках, обичайці і ребрах жорсткості барабана (рис. 4).

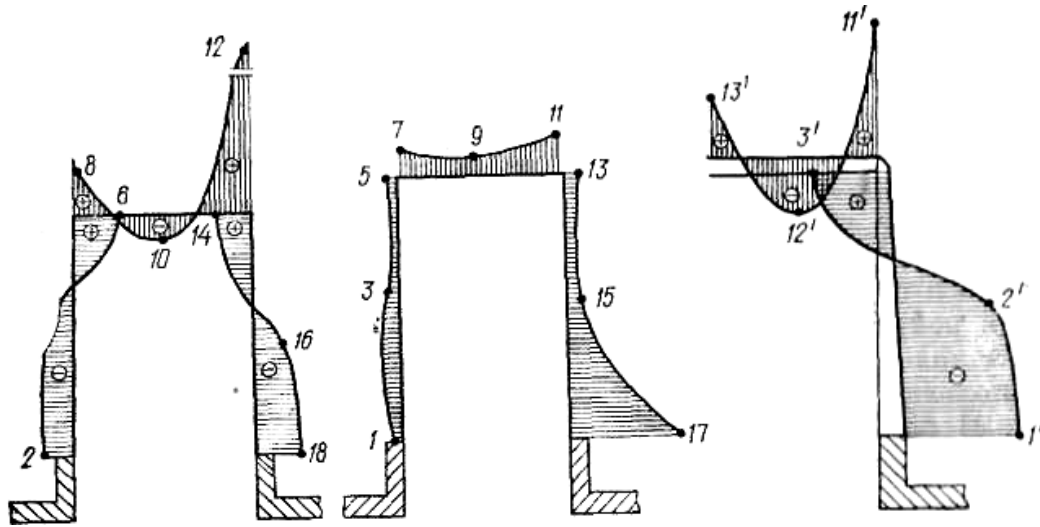


Рис. 4. Епюри розподілу напружень у барабані млина:
 а – радіальні напруження в торцевих стінах обичайки;
 б – тангенціальні напруження в стінках і обичайці барабана

Ці епюри наочно показують величини і характер розподілу напружень в радіальному і тангенціальному напрямках по висоті торцевих стінок і довжині обичайки барабана: максимальні напруження в торцевих стінках в радіальному напрямку становлять 20-22, в тангенціальному – 50 МПа (рис. 4, а і б). В обичайці барабана напруження в осьовому напрямку в центральній частині обичайки (точка 10) складають 12 МПа, на периферійній частині обичайки з боку навантаження (точка 8) зростають до 20, а з боку розвантаження (точка 12) – до 95 МПа, що, очевидно, пояснюється впливом приводу. Тангенціальні напруження в тих же точках становлять відповідно 9 і 18 МПа (рис. 4, а і б). В ребрах жорсткості торцевої стінки барабана (рис. 4, в) максимальні напруження зареєстровані в нижній частині ребра біля цапфи 50 МПа (точка 3), мінімальні – біля обичайки – 31 МПа (точка 3). В ребрах жорсткості обичайки максимальні напруження зареєстровані в місці зварювання ребра обичайки і ребер торцевих стінок – 28 і 65 МПа, в центральній частині ребра напруження значно менше – 24 МПа (рис. 4, в).

В результаті вимірювання напруження в ребрах жорсткості в небезпечному перерізі (у місці їх руйнування) встановлено що середні значення напруження вигину у вертикальній площині складають 15 МПа, в горизонтальній площині (у площині ребра) – 13,5 МПа. Напруження від розтягуючих зусиль в ребрі досягає 38-40 МПа. Характер зміни цієї напруження за один цикл такий же як і сумарного напруження в усіх точках вимірів на корпусі і ребрах жорсткості барабана млина.

Для зменшення напруження в небезпечному перерізі торцевої стінки біля цапфи і забезпечення сприятливішого розподілу напруження по її висоті торцеві стінки барабана рекомендується виконувати змінної товщини що плавно збільшується за лінійним або параболічним законом від периферії до цапфи

(рис 5а); при виконанні торцевих стінок барабана постійної товщини рекомендується здійснювати плавний перехід від стінки завтовшки 56-70 мм до кільцевого фланця завтовшки 140-200 мм причому з'єднання частин стінки постійної і змінної товщини необхідно здійснювати на максимально можливому діаметрі (у зоні мінімального напруження).

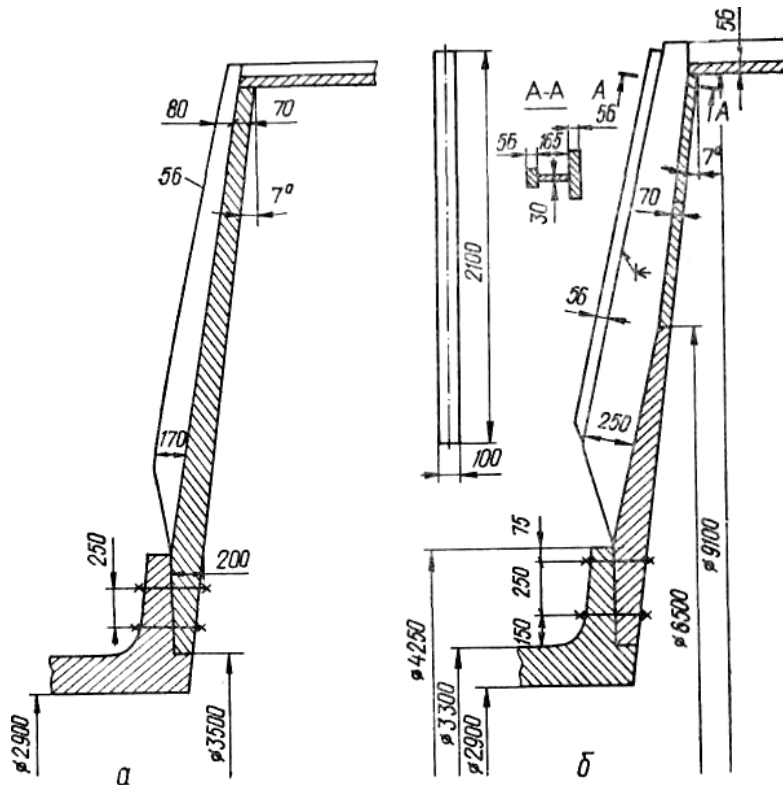


Рис. 5. Рекомендовані конструкції торцевих стінок барабанів млинів:
а – змінна, що плавно збільшується від периферії до цапфи за лінійним законом товщини з плоскими ребрами жорсткості, що відливаються із стінками;
б – з плавним переходом від постійної до змінної товщини і ребрами жорсткості таврового перерізу

Висновки

1. У барабані млина зварної конструкції виникають значні залишкові напруження що досягають небезпечних значень в зварних швах ребер жорсткості, а також в місці приварювання торцевої стінки завтовшки 56 мм до кільцевого фланця завтовшки 205 мм; тому ці перерізи є небезпечними концентраторами напруження.

2. При дії на барабан динамічних навантажень в торцевих стінках постійної товщини і в обичайці барабана виникають значні напруження знакозмінного характеру з майже симетричним циклом які мають тенденцію до різкого збільшення в торцевих стінках – у напрямку до цапфи, в обичайці – до периферії (особливо у бік приводної стінки), причому характер розподілу напруження близький до параболічного.

3. Посилення торцевих стінок барабана радіальними ребрами жорсткості плоскої форми призводить до зниження напруження в них, але не усуває їх нерівномірного розподілу в радіальному перерізі.

4. Посилення барабана сумірними ребрами жорсткості на торцевій стінці і обичайці призводить до істотного зниження напруження в стінці, зменшує концентрацію напруження в небезпечному перерізі (біля сполучного фланця); у ребрах жорсткості торцевої стінки в цьому випадку відбувається перерозподіл напруження по висоті з тенденцією до зменшення в небезпечному перерізі.

5. У ребрі жорсткості плоскої форми виникають значні напруження вигину як у вертикальній так і в горизонтальній площині (у площині ребра), які можуть стати причиною значних деформацій ребер.

6. При застосуванні рухливих сферичних самоустановлювальних опор підшипників барабана напруження в його стінках менше за величиною і більш рівномірні за характером розподілу (особливо в небезпечному перерізі) ніж при застосуванні жорстких нерухомих опор (чи сферичних з недостатньою рухливістю).

7. Для зменшення напруження в небезпечному перерізі торцевої стінки біля цапфи і забезпечення сприятливішого розподілу напруження по її висоті торцеві стінки барабана рекомендується виконувати змінної товщини.

8. Обичайку барабана рекомендується також виконувати змінної товщини зі збільшенням від осі обичайки до периферії (у напрямку торцевих стінок барабана).

9. При посиленні торцевих стінок барабана млина ребрами жорсткості виконувати їх слід також змінної висоти, що збільшується до цапфи, при цьому доцільно встановлювати відповідні ребра і на обичайці.

10. Найбільш прийнятна конструкція барабана, в якому несущими основне навантаження елементами (разом із стінкою) є ребра змінної товщини, що збільшується у напрямі до цапфи. При цьому ребра жорсткості рекомендується виконувати з додатковими полицями на вільній стороні ребра (таврового перерізу) для забезпечення необхідної граничної жорсткості. Найбільш раціональним є варіант, коли ребра жорсткості торцевих стінок таврового перерізу жорстко сполучені з відповідними ребрами на обичайці і з цапфою барабана, утворюючи таким чином жорстку рамку, що несе основне навантаження.

11. При проведенні зварних робіт на барабані рекомендується в обов'язковому порядку застосовувати комплекс заходів по зняттю залишкового напруження.

12. Для підшипників барабанів слід використовувати самоустановлювальні рухомі опори з можливістю ретельного контролю їх стану.

13. При виготовленні і збірці барабана необхідно ретельно контролювати стан цапф, дотримуватися необхідної величини затягування болтового з'єднання цапф з торцевими стінками барабана при періодичній контрольній підтяжці болтів (особливо в перші 2-3 роки експлуатації млина); при утрудненнях у виконанні цих вимог можливе застосування силового зварного шва додатково до болтового кріплення цапф до барабана.

Перспективним напрямком подальших досліджень є моделювання напруженого стану барабану млина самоподрібнення з допомогою програмного ресурсу SolidWorks [11, 12], а також шляхом імітації навантаження в полі відцентрових сил.

Список літератури

1. Morrell S. A new autogenous and semi-autogenous mill model for scale-up, design and optimisation /S. Morrell // Minerals Engineering. 17(3) p.437–445 · March 2004. 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), 70–77. DOI: 10.1016/j.mineng.2008.04.009.
3. Jabbari M. and Mohazzab A. H. Analytical Solution for Centrifugal Force Effect in Functionally Graded Hollow Sphere, Applied Mechanics and Materials, Vols. 110–116, pp. 2829–2837, 2012. 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 та ін. – Кременчук: Кременчуцький національний ун-т ім. М. Остроградського, Академія гірничих наук України. 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, Донецьке відділення НТШ, 2012. – 284 с.
8. 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.
9. Потураев В.Н., Сокур М.И. Мельницы самоизмельчения. – К.: 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.– 5 е.– Деп. в Черметинформ. 27.09.76; № 97-76 Деп.
11. SOLIDWORKS Flow Simulation. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm>.
12. Darin Grosser. The Future of SolidWorks Has Always Been [Electronic resource]. – 2011. – Access mode: <http://blog.dasisolutions.com/2011/09/27/the-future-of-solidworks-has-always-been-in-your-hands/>.

© 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*