

УДК 622.673.1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДКРІПЛЕНЬ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН РОЗРІЗНИХ БАРАБАНІВ ШАХТОВИХ ПІДЙОМНИКІВ

**К.С. Заболотний, професор, д.т.н., О.Л. Жупієв, ст. викладач,
Є.М. Сосніна, аспірант, Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ**

Анотація. Висвітлено результати комп'ютерного моделювання кінцево-елементної моделі розрізного барабана шахтової піднімальної машини, обладнаного різними підкріпленнями, а також моделювання непідкріпленого барабана з метою розробки його раціональної конструкції при зменшенні маси та забезпеченні стійкості.

Ключові слова: шахтова піднімальна машина, розрізний барабан, напружено-деформований стан, підкріплення, стійкість.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДКРЕПЛЕНИЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРЕЗНЫХ БАРАБАНОВ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНИКОВ

**К.С. Заболотный, профессор, д.т.н., А.Л. Жупиев, ст. преподаватель,
Е.Н. Соснина, аспирант, Государственное высшее учебное заведение
«Национальный горный университет», г. Днепропетровск**

Аннотация. Отражены результаты компьютерного моделирования конечно-элементной модели разрезного барабана шахтной подъемной машины, оборудованного различными подкреплениями, а также моделирования неподкрепленного барабана с целью разработки его рациональной конструкции при уменьшении массы и обеспечении устойчивости.

Ключевые слова: шахтная подъемная машина, разрезной барабан, напряженно-деформированное состояние, подкрепление, устойчивость.

RESEARCH INTO REINFORCEMENTS ON STRESS-AND-STRAIN STATE OF SPLIT-TYPE MINE HOIST DRUMS

**K. Zabolotniy, Professor, Doctor of Engineering Sciences,
A. Zhupiyev, Associate Professor, E. Sosnina, post-graduate,
State Higher School «National Mining University», Dnipropetrovsk**

Abstract. Results of computer modeling of finite-element model of split-type mine hoist drums equipped with various reinforcements as well as modeling of non-reinforced drums in order to develop its rational design while reducing their weight and ensuring their rigidity have been presented.

Key words: mine winder, split-type drum, stress-and-strain state, reinforcement, stability.

Вступ

Великі шахтові піднімальні машини (ШПМ) призначені для підйому та спуску людей і вантажів вертикальними і похилими гірничими виробками. Вони відрізняються одна

від одної тільки корінними частинами. Кожна з таких частин має у своєму складі один розрізний, два циліндричні або один біциліндроконічний розрізний барабан. Решта вузлів великих ШУМ є уніфікованими.

Розрізний барабан – одинарний, циліндричний, зварної конструкції – складається з двох частин: заклиненої (широкої) та переставної (вузької). Машини з розрізним барабаном мають менші, порівняно із двобарабанными, габаритні розміри, що можна віднести до їх переваг. Також у них раціонально використовується навивальна поверхня барабана, розрахована на два канати. Вузька частина барабана забезпечує механізоване регулювання довжини канатів шляхом її перестановки.

У цих машинах (рис. 1) обичайку 8 виконано у вигляді вальцьованого з товстостісового металу циліндра, на зовнішній поверхні якого нарізано гвинтову канавку для укладання піднімального каната. Нижній канат 2 закріплено на заклиненій частині барабана, він може навиватися тільки до площини розрізу, тобто до переставної частини барабана. Верхній канат 1, закріплений на переставній частині барабана, переходить через розріз.

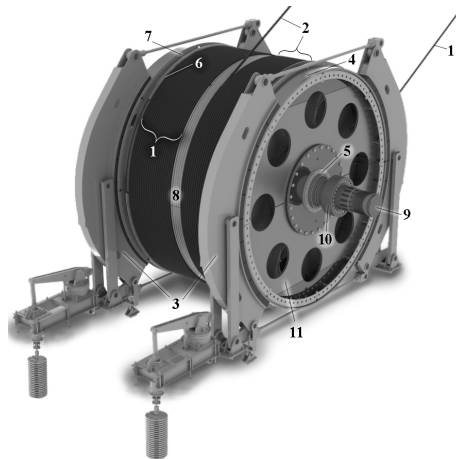


Рис. 1. Барабан ШПМ типу ЦР з гальмами: 1 – намотуваний канат зі скіпом; 2 – змотуваний канат із противагою; 3 – гальмівні колодки; 4 – гальмівні поля; 5 – маточини; 6 – мала реборда; 7 – велика реборда; 8 – обичайка; 9 – вал; 10 – підшипники; 11 – лобовини

Для збільшення жорсткості барабанів використовуються різні види підкріплень (рис. 2). Обичайку підкріплено двома шпангоутами (кільцевими ребрами), *а*, *б*, що встановлені на однаковій відстані між лобовинами. Ділянку заклиненої частини, яка межує із площиною розрізу, а з іншого боку обмежена лобовиною, часто підкріплюють косинками *е* для зменшення навантаження на зварні шви між обичайкою та лобовинами. Окрім цього, для

підкріплення ділянки використано шпангоут *г*, розміщений поряд із площиною розрізу. Додатково розташовують ще один шпангоут *в* із внутрішнього боку лобовини на такій самій відстані. Для збільшення жорсткості між отворами лобовин до них приварюються ребра *д* із криволінійним переходом. Під дією знакозмінних навантажень, спричинених вагою каната й барабана, обичайка починає коливатись. Підкріплення типу «стрингер» служать для збільшення її згинальної жорсткості. Було запропоновано три їх види: трапецеїдальні *ж* з обробкою твірної після зварювання, трапецеїдальні *и* зі зміною кута нахилу твірної, та П-подібні *к*, що приварюються до лобовин.

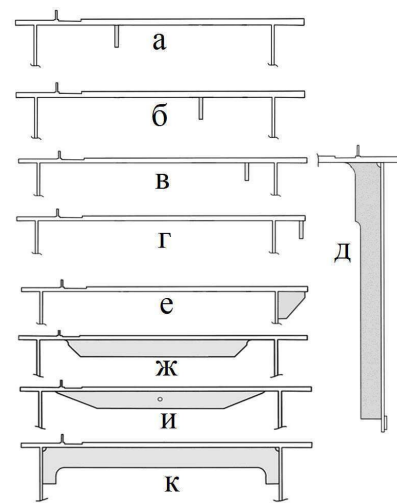


Рис. 2. Схема підкріплень барабана ШПМ

З досвіду експлуатації ШПМ відомо, що саме в місцях приєднання підкріплювальних елементів нерідко виникають тріщини. На відміну від вітчизняних, на ШПМ зарубіжного виробництва часто застосовують барабани без підкріплень. Тому детальне дослідження напружено-деформованого стану (НДС) розрізних барабанів може бути цікавим із практичних міркувань.

Аналіз публікацій

Дослідженням впливу конструктивних параметрів барабана ШПМ на міцність свого часу займалися такі вчені як З.М. Федорова, Б.Л. Давидов, Б.С. Ковальський, Ф.Л. Шевченко, К.С. Заболотний, Н.В. Фідоровська, В.В. Нестеренко. Зокрема С.Н. Зінченко, Л.Н. Дядик, Ф.Л. Шевченко розробили методи розрахунку органів намотування барабанних і багатоканатних ШПМ, у яких було вра-

ховано тиск намотаного каната, гальмівне навантаження, власна вага та дія зосереджених сил натягу канатів.

Автори вважали за потрібне знехтувати ослабленням тиску канатного навантаження в сусідніх витках. Разом з цим даний фактор викликає зниження навантажень на обичайку, а значить і зменшення в ній напружень. Одночасно врахування ослаблення натягу каната дає можливість виявити завищений запас міцності конструкції. Б.С. Ковальський досліджував ослаблення натягу витків каната в умовах навантаження нескінченної гладкої оболонки без підкріплень і лобовин [1]. Але результати його досліджень не підходять для барабана з лобовинами та підкріпленнями.

У роботах Н.В. Фідровської для розрахунку ослаблення змінного по колу натягу в робочих витках каната прийнято закон Ейлера (традиційно його застосовують до витків тертя) [2]. Але цей закон не можна використати для пояснення процесу намотування каната при слабозмінному натягу, тобто під час спуску/підйому вантажу. Роботи В.В. Нестеренко включають дослідження НДС барабана, підкріпленого кільцями жорсткості, що мають різні розміри та місця розташування [3]. НДС підкріплень інших типів не було досліджено.

Мета та постановка задачі

Визначення впливу підкріплень на напружено-деформований стан розрізних барабанів шахтних піднімальних машин із використанням методу обчислювального експерименту. Для цього необхідно вирішити такі завдання:

1. Визначити напруження у заклиненій та переставній частинах барабана без підкріплень і встановити серед них найбільш навантажену.
2. Провести обчислювальний експеримент для визначення НДС найбільш навантаженої частини барабана, обладнаної різноманітними підкріпленнями.
3. Обґрунтувати раціональну конструкцію розрізного барабана та перевірити її стійкість.

Дослідження впливу підкріплень на НДС розрізних барабанів

Авторами обґрунтовано модель навантаження циліндричного розрізного барабана [4]. В основі такої моделі лежить розподіл

навантаження в кожній канавці, викликаного радіальним тиском намотаного каната з урахуванням послаблення натягу у витках при підйомі вантажу, що виникає внаслідок деформації обичайки. Цей розподіл було описано за допомогою матриці впливу, отриманої на основі скінченно-елементних розрахунків твердотільної моделі.

Було виконано розрахунок із застосуванням додатка Simulation до програмного пакета SolidWorks. Його метою було визначення НДС барабана без підкріплень, який включає заклинену й переставну частини, та порівняння напружень у цих частинах (рис. 3). Оскільки навантаження, яке створює тиск від каната, є осесиметричним, то для зменшення часу розрахунку було використано 1/8 частину скінченно-елементної моделі барабана. Дослідження класу ШПМ з розрізним барабаном відбувалось на прикладі установки типорозміру ЦР-6х3,4/0,6.

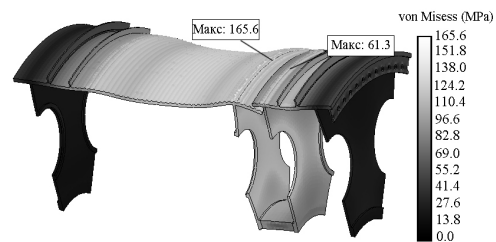


Рис. 3. Поле напружень заклиненої та переставної частин барабана ШПМ типу ЦР

Максимальні напруження в обичайці заклиненої частини барабана в 2,7 раза перевищують напруження в переставній частині. У зв'язку з цим перш за все необхідно було розробити конструктивні рішення, що дозволять зменшити максимальні напруження в обичайці заклиненої частини.

Шляхом виконання багатофакторного обчислювального експерименту засобами програми SolidWorks Simulation було досліджено найбільш навантажену заклинену частину барабана зі змінними дискретними факторами. Результати експерименту зведено в табл. 1. У таблиці використано такі позначення дискретних факторів: Ш_а, Ш_б, Ш_в, Ш_г – застосування шпангоутів залежно від місця їх розташування (на рис. 2 схеми а, б, в, г); Р – застосування ребер (д); К – застосування косинок (е); С_а, С_б, С_в – застосування стрингерів трьох конструкцій (ж, и, к). Також позначено параметри: * – підкріплення,

в якому під час поточного дослідження виникали максимальні напруження; σ_0 – максимальна інтенсивність напружень в обичайці; σ_n – максимальна інтенсивність напружень у підкріпленні; m – маса підкріплення. Дослідження передбачає неповнофакторний план експерименту, оскільки використання деяких комбінацій факторів не було можливим з конструктивних міркувань. Зокрема шпангоут Ш_B не може бути використаний разом із ребрами P , оскільки вони перетнуться. З тієї самої причини неприпустимо застосовувати в одній конструкції косинки K і шпангоут Ш_r , а також стрингери трьох конструкцій C_a , C_b , C_v у поєднанні зі шпангоутами Ш_a , Ш_b і Ш_v .

Таблиця 1 Показники максимальних напружень в заклиненої частині барабана й маси підкріплень

Номер досліджу	Фактори	σ_0 , МПа	σ_n , МПа	m , кг
1	–	188	–	–
2	K^*	221	158	161
3	Ш_B^*	175	69	1247
4	Ш_r^*	154	50	1247
5	C_a^*	194	241	671
6	C_b^*	198	197	852
7	C_v^*	177	170	1309
8	P^*	188	208	757
9	$\text{Ш}_r, P^*$	154	174	2004
10	$\text{Ш}_a, \text{Ш}_b, \text{Ш}_r, P^*$	154	179	4498
11	$\text{Ш}_a, \text{Ш}_b, P^*$	188	212	3251
12	$K^*, \text{Ш}_a, \text{Ш}_b, P$	200	278	3412
13	K^*, P	209	280	918
14	$K^*, \text{Ш}_r$	191	153	1408
15	$K^*, \text{Ш}_a, \text{Ш}_b$	202	176	2655
16	K, C_a^*	209	243	832
17	K, C_b^*	215	193	1013
18	K^*, C_v	170	363	1470
19	$\text{Ш}_r, C_a^*$	159	233	1918
20	$\text{Ш}_r, C_b^*$	171	202	2099
21	$\text{Ш}_r, C_v^*$	148	161	2556
22	$\text{Ш}_a, \text{Ш}_b^*$	189	99	2494
23	$\text{Ш}_v^*, \text{Ш}_r$	134	74	2494

З аналізу експериментів випливає, що найменші напруження виникають, коли шпангоут розміщено біля площини розрізу, але тоді збільшується маса барабана на 1247 кг. Найбільш не вигідним, за критерієм маси (додає 4498 кг), виявилось поєднання реберного підкріплення та двох шпангоутів між лобовинами і шпангоута біля площини розрізу. І все ж порівняно з показниками барабана без підкріплень така конструкція зменшує мак-

симальні напруження на 5 %. Найбільш небезпечний за критерієм напружень – це випадок, коли для підкріплення використано косинки й П-подібні стрингери (за таких умов, порівняно з показниками барабана без підкріплень, напруження зростають на 98 %, а маса конструкції збільшується на 1470 кг). У конструкції без підкріплень максимальні напруження на 19 % є вищими, ніж ті, що виникають у конструкції з найменшими напруженнями. Використання шпангоутів не викликає зміни місця виникнення максимальних напружень (це обичайка барабана), але сприяє підвищенню жорсткості обичайки і зменшенню в ній інтенсивності напружень. У тих конструкціях барабана, де застосовано підкріплення у вигляді косинок або ребер, максимальні напруження виникають саме в цих підкріпленнях. При спільному використанні косинок і ребер максимум напружень з'являється в перших, а при встановленні шпангоутів і стрингерів найбільші напруження спостерігаються в останніх. Застосування косинок і П-подібних стрингерів призводить до появи максимальних напружень у перших, а використання косинок і двох інших конструкцій стрингерів – в останніх.

Таким чином, застосовуючи косинки і стрингери, не вдалося досягти зниження напружень в обичайці; до того ж мало місце збільшення маси барабана; наявність же ребер не суттєво знижує напруження, але також додає маси конструкції. Виявлено, що найменшу масу має барабан без підкріплень.

Отже, з огляду на результати експерименту рекомендовано використовувати підкріплення барабана шпангоутом, що розміщується біля площини розрізу, або не підкріплювати барабан, і це залежить від рівня допустимих напружень. На відміну від підкріпленого, непідкріплений барабан за однакових умов навантаження може втрачати працездатність через появу значних переміщень його елементів і виникнення згинальних напружень. Оцінювати цю можливість прийнято за допомогою коефіцієнта запасу стійкості, який розраховують шляхом розв'язання лінійної задачі втрати стійкості. Для перевірки доцільності використання цього методу проведено розрахунок втрати стійкості й нелінійний розрахунок переміщень непідкріпленого барабана засобами програми SolidWorks Simulation. Графік результатів цих розрахунків подано на рис. 4.

Оскільки коефіцієнт запасу, визначений за допомогою лінійної задачі втрати стійкості, $k_n = 2,66$, то для нелінійного розрахунку було обрано максимальне значення тиску, що в 3 рази є більшим від робочого. З конструктивних міркувань було прийнято, що величина допуску на зазор між переставною та заклиненою частинами становить 2 – 5 мм. Обмежену цим допуском зону на графіку показано двома пунктирними лініями – 2 і 5. Лінія 1 відповідає робочому тиску, а лінія 2,66 показує величину тиску, за якого відбувається втрата стійкості конструкції, згідно з лінійною теорією пружності.

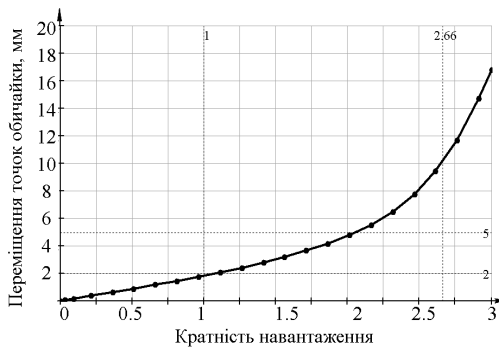


Рис. 4. Залежність переміщень точок обичайки барабана від кратності навантаження

Графік складається з двох частин: перша відповідає значенням кратності навантаження від 0 до 1,6, де кут нахилу кривої є невеликим, тобто спостерігаються незначні переміщення, тому з урахуванням похибки в 1% можна користуватися лінійним аналізом; друга частина кривої починається від точки, що відповідає кратності 1,6 (будемо вважати це значення коефіцієнтом k_n запасу стійкості конструкції при випинанні), – вона демонструє істотно нелінійну залежність переміщення від навантаження, а тому доцільним буде для її визначення застосувати нелінійний аналіз. Оскільки значення величини k_n більше від k_n у 1,44 рази, то до цього типу задач буде некоректним застосовувати аналіз втрати стійкості. Як бачимо, значення коефіцієнта запасу стійкості при випинанні перебуває в межах допустимих норм (від 1,5 до 3). У зв'язку з цим можна сказати, що заклинена частина барабана не втрачає стійкості під дією робочого тиску.

У межах робочого навантаження барабана можна користуватися лінійним аналізом НДС, а переміщення його елементів вклада-

ються в допустимий діапазон, коли кратність навантаження набуває значень від 1 до 1,6.

Висновки

З огляду на результати досліджень можна зробити висновок, що всі підкріплення, тією чи іншою мірою, збільшують масу барабана і нерідко викликають збільшення напружень у його обичайці.

Отже, залежно від рівня допустимих напружень рекомендується підкріплювати розрізний барабан ШПМ шпангоутом, що межує із площиною розрізу, або використовувати барабан без підкріплень, бо він не втрачає стійкості під дією робочого тиску.

Література

1. Ковальский Б.С. Нагрузка канатных барабанов и бобин / Б.С. Ковальский // Стальные канаты: сб. статей. – К.: Техніка. – 1966. – Вып. 3. – С. 89–107.
2. Фідровська Н.М. Вісінесиметричний стиск циліндричної оболонки / Н.М. Фідровська // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет»: зб. наук. праць. Тем. вип. «Машинознавство та САПР». – Х.: НТУ «ХП». – 2008. – Вип. 9. – С. 85–90.
3. Нестеренко В.В. К испытаниям канатного барабана с подкрепляющими кольцами и ребрами жесткости / В.В. Нестеренко // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА. – 2010. – Вип. 58. – С. 142–148.
4. Заболотный К.С. Обоснование компьютерной модели барабана и расчетных нагрузок шахтной подъемной машины / К.С. Заболотный, А.Л. Жупиев, Е.Н. Соснина // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – 2011. – Вип. 92. – С. 275–278.

Рецензент: І.Г. Міренський, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 27 червня 2012 р.