УДК 621

Заховайко[1] О.П. к.т.н., доц., Костюченко[2] В.В., Манзик[1] Н.В.
1 – НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; 2 – ТОВ «Вікторія», м. Київ ,Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ ТА РОБОТОСПРОМОЖНОСТІ ОПОРИ КУЛЬКОВОЇ ВІЛЬНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗА СТАТИЧНОГО І ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Zakhovaiko[1] O., Kostyuchenko[2] V., Manzyk[1] N.
1-The National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (mmi@kpi.ua), 2-LTD "Victoriya"

STUDY OF BALL TRANSFER UNIT STRUCTURAL STRENGTH AND PERFORMABILITY AT STATIC AND DYNAMIC LOADING

Представлені результати експериментальних досліджень конструкційної міцності та роботоспроможності опор кулькових вільного переміщення виробництва ТОВ "Вікторія" (Україна) в залежності від твердості матеріалу корпуса та кількості кульок у ложі опори. Описані методика експериментів та спеціальне обладнання, спроектоване та виготовлене для їх проведення. Встановлені оптимальні режими термічної обробки корпусу опори та її реальні запаси міцності при нормативних рівнях статичних і динамічних навантажень. Проведена також оцінка роботоспроможності опори, яка визначалась, виходячи з можливості повного провертання центральної кулі в ложі з менших кульок при різних рівнях навантаження.

Ключові слова: опора кулькова вільного переміщення, міцність, роботоспроможність, деформація, руйнування, статичне та динамічне навантаження.

Вступ

На сьогодні кулькові опори вільного переміщення (ball transfer units) набули великого поширення в різних галузях промисловості, транспорту, сфери торгівлі та послуг завдяки високій ефективності при транспортуванні вантажів.

Кулькові опори вільного переміщення являють собою досить прості за конструкцією вузли, призначені заміняти тертя ковзання тертям кочення в системах для транспортування різноманітних вантажів у площині в різних напрямках. Застосовують їх в найрізноманітніших конструкціях: від звичайних монтажних столів до виробничих ліній та великих кулькових площ на аеродромних терміналах та автоматизованих складах.

Перші патенти на кулькові опори вільного переміщення з'явилися в середині минулого століття. Характерною особливістю їх конструкції є наявність центральної великої кулі, яка розміщується в ложі з менших кульок, а саме ложе знаходиться в жорсткому корпусі. Така конструкція переводить тертя ковзання в тертя кочення і дозволяє маніпулювати важким вантажем з мінімальними зусиллями. Наприклад, щоб зрушити вантаж, який знаходиться на кулькових опорах, потрібно прикласти силу, яка складає лише 5% від ваги вантажу. А для підтримки подальшого його переміщення необхідне зусилля складатиме всього 2-3% від ваги вантажу.

В Україні ТОВ «Вікторія» розробило та почало виробництво нового типу кулькової опори (рис. 1), яка відрізняється підвищеною вантажопідйомністю та здатністю працювати в агресивному середовищі. Дані опори були запатентовані в Україні [1] і Російській Федерації.

Одним з важливих етапів підготовки до запуску у виробництво кулькових опор було відпрацювання конструкції та технології їх виготовлення на основі натурних та чисельних експериментів для оцінки статичної та динамічної міцності опори при штатному навантаженні та в умовах нештатних короткотермінових перевантажень.

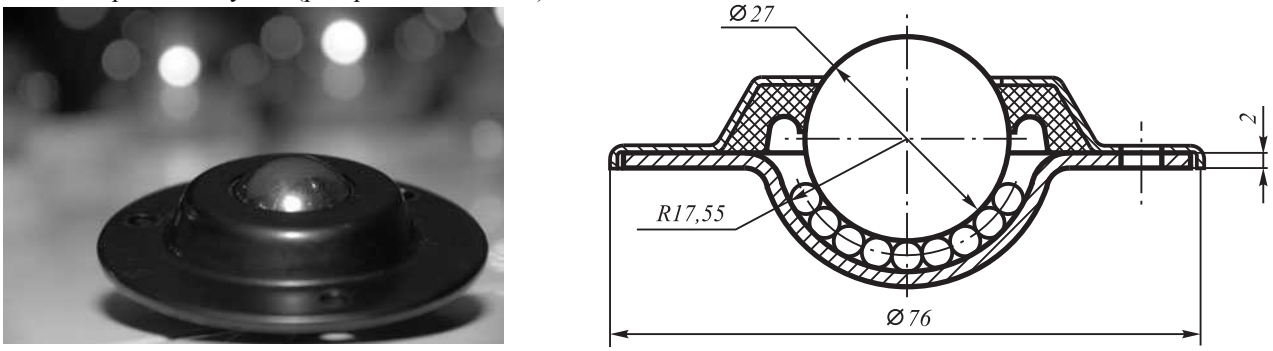
Дана стаття присвячена методиці проведення випробувань кулькових опор на статичну і динамічну міцність та роботоспроможність.

Метою випробувань було:

- встановлення оптимальних режимів термообробки деталей корпуса для забезпечення максимальної вантажопідйомності опори та здатності витримувати ударні навантаження з заданою енергією удару;
- перевірка роботоспроможності опори в залежності від прикладеного статичного навантаження;

© Заховайко О.П., Костюченко В.В., Манзик Н.В., 2012

– визначення максимальної статичної та динамічної вантажопідйомності в залежності від кількості напрямних кульок у ложі, способу фіксації фланця опори та ін.;
– порівняння роботоспроможності опори у двох випадках взаємного розташування центральної кулі та ложа з напрямних кульок: центральна куля над ложем (пряме положення) і ложе з напрямних кульок над центральною кулею (реверсне положення)



а *б*

Рис. 1. Опора кулькова вільного переміщення: *а* – загальний вигляд; *б* – в розрізі

Для проведення експериментів фахівцями кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів механіко-машинобудівного інституту НТУУ «КПІ» і ТОВ «Вікторія» було сконструйоване та виготовлене спеціальне оснащення, яке дозволяло максимально точно змоделювати умови роботи кулькових опор у складі реальних конструкцій.

Випробування при ударному навантаженні

Методика випробувань при ударному навантаженні розроблялась у відповідності до діючих на сьогодні технічних умов на подібні вироби, зокрема опори кульові передньої підвіски автомобіля [2]. Випробування проводились на ударному копрі з вертикально падаючим вантажем масою 16,725 кг (Свідоцтво Укрметртестстандарту № 35-08⁄81 від 04.07.2011 р.).

Об'єктами випробувань були кулькові опори, корпуси яких виготовлялись зі сталі 65Г з термічною обробкою загартуванням без вуглецю з подальшим відпуском на задану твердість. Кількість кульок у ложі складала 45 штук

Опора своїм фланцем жорстко фіксувалась за допомогою гвинтів на товстостінній масивній циліндричній підставці, яка в свою чергу була жорстко закріпленою на фундаментній плиті копра. Діаметр внутрішнього отвору підставки складав 45 мм.

В процесі випробувань висота падіння вантажу поступово збільшувалась. Після кожного удару проводилось візуальне обстеження корпуса опори. Також вимірювалась величина залишкової деформації корпуса, при цьому мірою деформації слугувало незворотне переміщення верхньої точки центральної кулі відносно фундаментної плити копра. Випробування продовжувались до виникнення першої тріщини в корпусі або ж його неприпустимо великої пластичної деформації.

Результати випробувань зведені до таблиці 1.

Таблиця 1

Результати випробувань ударної міцності опори кулькової з корпусом зі сталі 65Г

№ зразка	Показники, що вимірюються			
	Маса падаючого вантажу, кг	Висота падіння вантажу при руйнації корпусу опори, м	Руйнівна кінетична енергія вантажу в момент удару, Дж	Залишкова деформація корпусу (при падінні вантажу з висоти 0,7 м), мм
Твердість HRC43				
1-1	16,07682	1,35	212,7	0,7
Твердість HRC47				
2-1	÷	1,20	189,1	0,6
Твердість HRC49-50				
3-1	÷	0,97	152,8	0,35
3-2	÷	0,8	126,0	0,25
3-3	÷	0,9	141,8	0,3
Твердість HRC52-53				
4-1	÷	0,65	102,4	–
Твердість HRC55				
5-1	÷	0,55	86,6	–
Твердість HRC65				
6-5	÷	0,10	15,7	–
6-6	÷	0,15	23,6	–
6-7	÷	0,11	17,3	–
6-8	÷	0,17	26,8	–

На діаграмах (рис. 2), побудованих за даними табл. 1, показані залежності руйнівної енергії удару E_p та величини залишкової деформації корпуса опори Δ при фіксованій висоті падіння вантажу (заданій енергії удару) від ступеня загартування (твердості) корпуса кулькової опори.

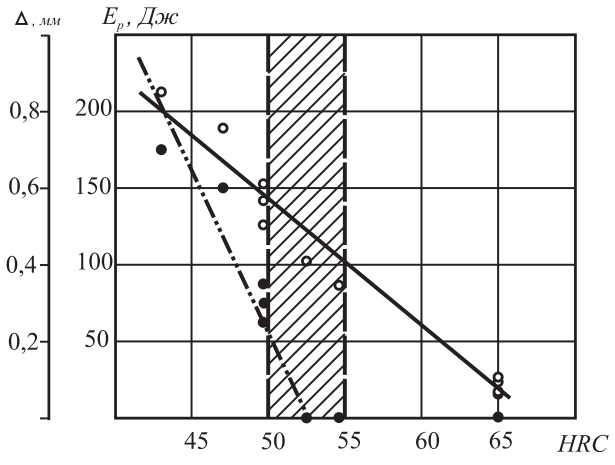


Рис. 2. Залежності руйнівної енергії удару (суцільна лінія) та залишкової деформації корпуса опори (пунктирна лінія) від твердості корпуса після загартування

Як свідчать результати випробувань, динамічна міцність корпуса при ударному навантаженні зменшується зі зростанням твердості його матеріалу. При цьому залишкова деформація корпуса також спадає. І вже при твердості HRC>52 спостерігається крихке руйнування корпуса без помітних залишкових деформацій.

На діаграмі (рис. 2) заштрихована область відповідає оптимальній твердості корпуса, яка забезпечує максимальну динамічну міцність опори при ударі без помітної залишкової його деформації.

Випробування при статичному навантаженні

Згідно з технічними умовами максимальне статичне навантаження на опору складає 8 кН. Щоб встановити руйнівне навантаження та визначити реальні запаси міцності опори за різної твердості матеріалу корпуса, були проведені випробування кулькових опор при статичному навантаженні.

Експерименти проводились на випробувальній машині TIRATEST-2300 (виробництва Німеччини) з діапазоном навантажень 0 – 100 кН та швидкостей переміщень рухомого захвата 0.01 – 600 мм/хв (Свідоцтво Укрметртестстандарту № 34-00/7152 від 12.10.201 р.). Стисна сила прикладалась до центральної кулі опори аж до руйнування корпуса. За результатами випробувань були отримані залежності навантаження від переміщення точки прикладання сили. В табл. 2 наведені значення руйнівної сили та величини деформації корпуса, що їй відповідала, яка характеризувалася максимальним переміщенням верхньої точки центральної кулі відносно жорсткої траверси випробувальної машини, на якій фіксувався корпус опори на момент його руйнування.

Як свідчать результати спостережень, залежно від твердості матеріалу корпуса змінюється характер його руйнування. При максимальній твердості HRC65 руйнування відбувалось при незначних залишкових деформаціях, при цьому тріщина виникала в зоні переходу від фланця до сферичної частини, тобто в зоні концентратора напружень. Зі зменшенням твердості рівень деформацій корпусу зростав, і за твердості HRC<50 при руйнівних або максимально досяжних для випробувальної машини навантаженнях спостерігались значні пластичні деформації як фланця так і сферичної частини корпуса.

Що стосується руйнівного статичного навантаження, то, як і у випадку з динамічним навантаженням, зі збільшенням твердості корпуса його величина зменшується. Так, значення руйнівної сили при мінімальній твердості у досліджуваному діапазоні більш як у двічі перевищує її величину за максимальної твердості корпуса.

Таблиця 2

Результати випробувань статичної міцності опори кулькової з корпусом зі сталі 65Г

№ зразка	Показники, що вимірюються			Примітки
	Твердіть	Величина руйнівного навантаження, Н	Деформація корпусу на момент руйнування, мм	
1-2	HRC43	99000	3,80	-
2-2	HRC47	> 100000	2,52	Деформація корпусу визначалась при Р=98 кН
3-6	HRC49-50	> 100000	2,25	Деформація корпусу визначалась при Р=98 кН
4-2	HRC52-53	81705	1,92	-
5-2	HRC55	98000	1,99	-
6-1	HRC65	36775	1,00	-
6-2		40050	0,65	-

Вважаючи граничним станом для опори виникнення наскрізної тріщини в її корпусі, реальні запаси міцності, в залежності від твердості корпуса, за номінального навантаження на опору 8000 Н склали:

- при HRC43 $n = F_{max} / F_{ном} = 99000/8000 = 12,375$;
- при HRC52-53 $n = 81705/8000 = 10,21$;
- при HRC55 $n = 98000/8000 = 12,25$;
- при HRC65 $n = 40050/8000 = 5,00$.

Перевірка роботоспроможності опори в залежності від прикладеного статичного навантаження

Кулькова опора вважатиметься роботоспроможною, коли навантажена центральна куля провертатиметься в корпусі в напрямку переміщення вантажу плавно, без заїдань та ривків. Для перевірки роботоспроможності опори було спроектоване та виготовлене спеціальне навантажувальне пристосування (рис. 3), яке дозволяє моделювати умови роботи кулькової опори вільного переміщення в реальних умовах експлуатації.

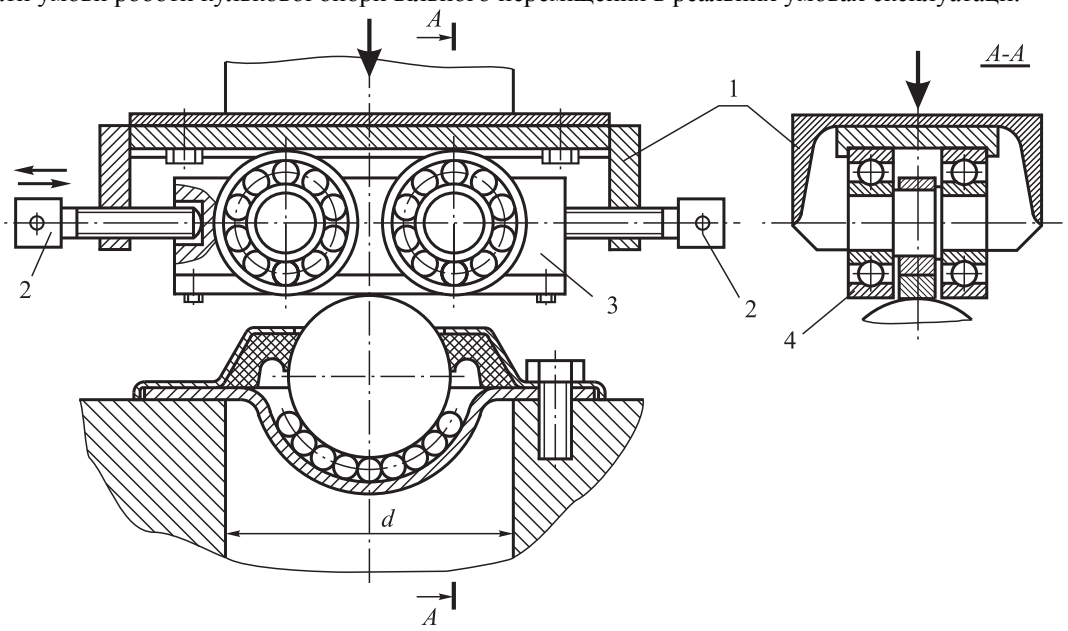


Рис. 3. Пристосування для випробувань на роботоспроможність опори кулькової

Пристосування складаються з навантажувальної платформи 1 з рушійними гвинтами 2 і каретки 3, оснащеної підшипниками кочення 4. Каретка являє собою загартовану пластину, яка під час випробувань опирається на центральну кулю опори. Навантаження передається від рухомої траверси випробувальної машини через навантажувальну платформу, підшипники та пластину каретки на кулькову опору, закріплену на нерухомій траверсі машини. Для перевірки роботоспроможості опори за певного навантаження за допомогою рушійних гвинтів каретка з підшипниками плавно переміщувалась відносно навантажувальної платформи в напрямку, перпендикулярному до напрямку дії навантаження. При цьому велося спостереження за характером обертання центральної кулі опори.

Випробуванням підлягали опори з твердістю корпуса HRC49-50. Величина максимального навантаження, прикладеного до кульки – 50 кН, що складає 6-кратне перевантаження відносно номінального в 8 кН. Навантаження проводилось східчасто з проміжним контролем здатності кульки до провертання в корпусі під зафіксованим навантаження. На всіх рівнях навантаження заклинювання кульки в корпусі для випробуваних зразків не спостерігалось.

Дослідження впливу кількості кульок на динамічну вантажопідйомність та роботоспроможність

Щоб перевірити ступінь впливу кількості напрямних кульок у ложі корпуса на вантажопідйомність та роботоспроможність опори, були проведені випробування опор зі збільшеною кількістю кульок n=90. Причому, опори перевірялись як в прямому положенні (центральна куля над ложем), так і в реверсному положенні (центральна куля під ложем). В реверсному положенні опора кріпилась безпосередньо до падаючого вантажу при ударних випробуваннях. Перевірці підлягали опори з корпусом, загартованим на твердість HRC49-50. Результати випробувань наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати випробувань динамічної міцності опори з різною кількістю напрямних кульок у ложі

№ зразка	Показники, що вимірюються		Примітки
	Маса падаючого вантажу,кг	Руйнівна кінетична енергія вантажу в момент удару Дж	
Нормальна кількість кульок в ложі (n=45)			
3-1	16,586	152,8	Опора кріпилась корпусом до основи з верхнім розташуванням кулі
1-3	÷	149,3	Опора кріпилась корпусом до падаючого вантажу з нижнім розташуванням кулі
Збільшена кількість кульок в ложі (n=90)			
2-5	÷	145,4	Опора кріпилась корпусом до основи з верхнім розташуванням кулі
2-6	÷	130,5	Опора кріпилась корпусом до падаючого вантажу з нижнім розташуванням кулі

Як показують результати експериментів при динамічному навантаженні кількість кульок мало впливає на ударну міцність опори як при прямому, так і в реверсному її розташуванні.

Випробування зразків опор з нормальною і збільшеною кількістю напрямних кульок при статичному навантажуванні силою 50 кН, підтвердили роботоспроможність кулькових опор як при прямому, так і при реверсному їх розташуванні.

Висновки. За результатами проведених експериментальних досліджень конструкційної міцності та роботоспроможності опор кулькових вільного переміщення була визначена оптимальна технологія виготовлення деталей опори, зокрема оптимальна твердість корпусу, за якої забезпечується статична та динамічна вантажопідйомність і гарантується її роботоспроможність в заданому діапазоні навантажень. Питання, пов'язані з оптимізацією конструкції опори, сформульовані у вступі (кількість напрямних кульок у ложі з точки зору контактної міцності корпуса, спосіб фіксації фланця опори і т.д.) передбачають проведення значного обсягу розрахунків скінченно-елементних моделей і будуть висвітлені в подальших публікаціях.

Аннотация. *Представлены результаты экспериментальных исследований конструкционной прочности и работоспособности опор шариковых свободного перемещения производства ООО "Виктория" (Украина) в зависимости от твердости материала корпуса и количества шариков в ложе опоры. Описана методика экспериментов и специальное оборудование, спроектированное и изготовленное для их проведения. Установлены оптимальные режимы термообработки корпуса опоры и ее реальные запасы прочности при нормативных уровнях статических и динамических нагрузок. Проведена также оценка работоспособности опоры, определявшаяся исходя из возможности полного проворачивания центрального шара в ложе малых шариков при различных уровнях нагрузки.*
Ключевые слова: опора шариковая свободного перемещения, прочность, работоспособность, деформация, разрушение, статическое и динамическое нагрузки.

Abstract. *Purpose. Justification of optimum heat treatment of ball transfer unit body was developed and patented by "Victoria Ltd." (Ukraine). These modes of heat treatment had to assure the maximum carrying capacity of ball transfer unit and its ability to withstand the load impact with given impact energy. Also the state of unit operability was investigated subject to applied static loading.*

Design/methodology/approach. The special experimental equipment was designed and manufactured for research. It allowed to simulate the real working conditions of ball transfer unit during the experiments. Entire test cycle was divided into three phases. Initially the units were subjected to impact loading with falling weight under increasing impact energy up to destruction of a body. The influence of steel body hardness on unit dynamic strength was estimated. Then samples of ball transfer units were loaded with static forces applied to central ball. Maximum failure load was determined and real safety factors were calculated subject to body hardness. Also unit operability at maximum load was investigated. It was estimated by possibility of full twisting central ball in the unit body.

Findings.Optimum regimes of hardening of the body and the actual ultimate load safety factor at the normal loading of the unit were defined.

Originality.New results on structural strength of ball transfer unit with steel punching body were obtained.
Keywords: ball transfer unit, strength, performability, deformation, fracture, static and dynamic loading.

1. *Пат*. 61002 Україна, Кульова опора [Текст] / Костюченко В.В., Резе В.Ф.; заявник і патентовласник Костюченко В.В. – № 2005 07482 ; заявл. 28.07.05 ; опубл. 15.12.05, Бюл. № 12. – 3 с. : ил.
2. *ТУ 3* України 5786106.027-94. Палець кульовий передньої підвіски верхній з захисним чохлом. Технічні умови. – Введ. 04.04.1994. – К.: 1994 – 24 с. зареєстровано в Українському республіканському управлінні Держстандарту 04.04.1994 в книзі обліку за №091/00074.
3. *ТУ У 34.3-01527695-026:2010*. Складові частини підвіски та рульового приводу автомобілів. Технічні умови. – Введ. 30.07.2010. – К.: 2010 – 35 с.; зареєстровано в Укрметртестстандарті 30.07.2010 в книзі обл. за №0256818/035867.
4. *Справочник* металлиста: Справочник. В 5-ти т. Т.2. / Под ред. А.Г. Рахштадта, В.А. Брострема. – М.: Машиностроение, 1976. – 720 с.

REFERENCES

1. *Pat. 61002* Ukrain, Kulyova opora (Ball Transfer Unit) [Text]. Kostyuchenko V.V., Reze V.F.; declarant and patentee Kostyuchenko V.V. no. 2005 07482; declared 28.07.05; publ. 15.12.05, Bul. No. 12, 3 p.
2. *TU 3 Ukraïni 5786106*.027-94. Palec' kul'ovij peredn'oï pidviski verhnij z zahisnim chohlom. Tehnichni umovi. Vved. 04.04.1994. Kyiv, 1994, 24 p.
3. *TU U 34.3-01527695-026:2010*. Skladovi chastini pidviski ta rulyovogo privvodu avtomobiliv. Tehnichni umovi (Component parts of car suspension and steering linkage. Technical specifications). Deployment 30.07.2010. Kyiv: 2010, 35 p.
4. *Spravochnik* metallista [Reference book of metal-worker]: Spravochnik. V 5-ti t. T.2. Pod red. A.G. Rahshtadta, V.A. Brostrema. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 720 p