

УДК 621.01(075.8)

Малашенко В. О., д.т.н., професор, Стрілець О. Р., аспірант (Національний університет «Львівська політехніка»), **Стрілець В. М., к.т.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРУЖНИХ ШПОНКОВИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ ПЕРІОДИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Описана методика експериментальних досліджень динаміки пружних шпонкових з'єднань при періодичному навантаженні і зроблені відповідні висновки у порівнянні з жорсткими шпонковими з'єднаннями.

Ключові слова: пружні шпонкові з'єднання, експеримент, періодичне навантаження.

Постановка проблеми. З'єднання вала з маточиною за допомогою пружних шпонок передають обертальний момент силами деформації цих шпонок і силами тертя, що виникають на поверхнях контакту маточини і вала та на контактних поверхнях шпонок з пазами вала і маточини. Динамічні навантаження гасяться пружними деформаціями таких шпонок і вказаними силами тертя. Тому виникає необхідність експериментальної перевірки динамічних процесів у таких шпонкових з'єднаннях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У машинобудуванні широко відомі з'єднання валів з маточинами жорсткими шпонками [1]. Останнім часом для таких з'єднань на рівні патентів розроблені пружні шпонки [2-6]. Використання таких шпонок дозволяє змінювати жорсткість шпонкового з'єднання і м'якше передавати обертальний момент від вала до маточини або навпаки, тобто без ударів, що позитивно впливає на довговічність привода.

Теоретичним питанням динаміки з'єднань пружними призматичними шпонками присвячені роботи [7, 8], а експериментальним – [9]. Однак, проведені теоретичні дослідження ще потребують подальшого експериментального дослідження та підтвердження отриманих результатів в реальних практичних ситуаціях для різних режимів навантаження.

Метою роботи є проведення експериментальних досліджень динаміки пружних шпонкових з'єднань, що застосовуються для з'єднання

різноманітних деталей обертового руху під час передачі ними довготривалого періодичного навантаження, без врахування сил тертя у сполучі вал-маточина.

Реалізація роботи. Експериментальні дослідження динамічних властивостей таких з'єднань у порівнянні з жорсткими шпонковими з'єднаннями проведені на спеціально розробленому та виготовленому стенді [10-12].

Схема основної загальної частини запатентованих стендів для експериментального дослідження статичних та динамічних властивостей пружних шпонкових з'єднань показані на рис. 1, в яких є шпонкове з'єднання 1, яке складається з нерухомого вала 2, навантажувальної втулки 3, підшипників 4 і 5, шайби 6, гайки 7 і шпонки 8. Нерухомий вал жорстко закріплений в опорі 9, яка складається з корпусу 10 і кришки 11, через квадратну хвостову ділянку за допомогою шпильок 12 і гайок 13. Для виключення деформації згину нерухомого вала встановлена знімна опора 14, у різьбовому отворі якої встановлений гвинт 15, який через конічний кінець 16 взаємодіє з центровим отвором 17 нерухомого вала. Навантажувальна втулка шпонкового з'єднання жорстко з'єднана з одним кінцем важеля 18 за допомогою зварювання, а над другим його кінцем розміщується спеціальне обладнання залежно від виду навантаження. Вимірювання деформацій і коливних явищ у шпонкових з'єднаннях для різних видів навантаження, здійснюється через тензорезисторний давач 19. Шпонкове з'єднання разом з опорами встановлені на рамі 20. Для установки рами в горизонтальне положення служать ніжки 21.

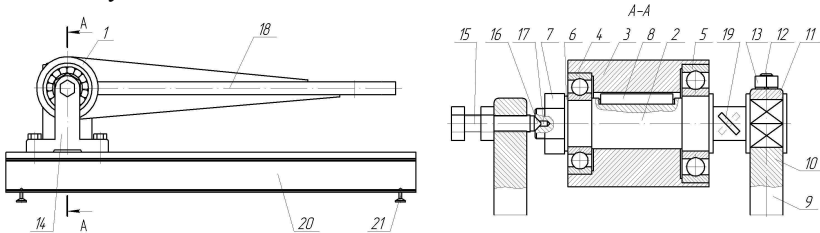


Рис. 1. Схема загальної частини стенда для дослідження шпонкових з'єднань

Даний стенд дозволяє досліджувати шпонкові з'єднання, на які діють різні типи навантаження. Для цього використовується додаткове знімне обладнання.

Під час досліджень шпонкових з'єднань, навантаження яких змінюється періодично впродовж тривалого часу, на стенді над вільним кінцем важеля на рамі встановлюється додаткове обладнання, яке

складається з електродвигуна 22, клинопасової передачі 23, опори з валом 24 і кулачка 25, який через регулювальний гвинт 26 взаємодіє з важелем 18 (рис. 2).

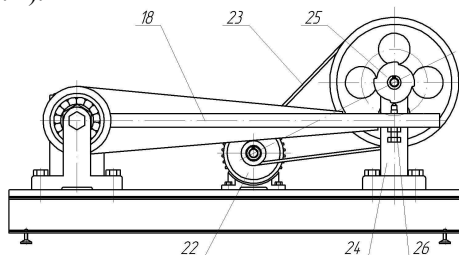


Рис. 2. Стенд з обладнанням для навантаження, яке змінюється періодично

Діаметр сполюки вал-маточина $d = 60$ мм, а пружні призматичні шпонки (рис. 3, а) мали такі розміри: $b \times h \times l = 18 \times 12 \times 90$ мм і $b_1 = 4; 6; 8; 10$ мм, тобто з відношенням b_1/b рівним відповідно від 0,2 до 0,7.

У порядку співставлення було випробувано також з'єднання з жорсткою призматичною шпонкою $b \times h \times l = 18 \times 12 \times 90$ мм (рис. 3, б).

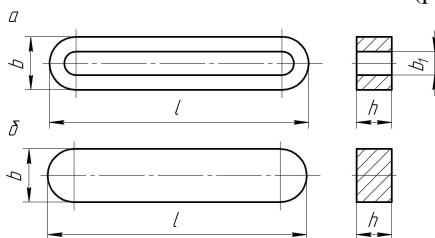


Рис. 3. Призматичні шпонки: а – пружна; б – жорстка

Для визначення статичного обертового моменту на важіль встановлюється вантаж $F_{ig.} = 100; 200; 300; 400; 500$ Н. Довжина плеча установлення цих вантажів $l_{Fg} = 700$ мм, а довжина плеча до центра маси важеля $l_{Fe} = 240$ мм. Тоді створені цими вантажами статичні обертові моменти будуть відповідно: 156, 226, 296, 366 і 436 Н·м. Через тензорезисторний давач і тензометричну станцію ТС-8 записаний калібрувальний графік. Далі такі величини статичних обертових моментів створювались за допомогою регулювального гвинта, який опираючись на виступ кулачка відхиляв важіль і, при цьому, деформувалось шпонкове з'єднання та нерухомий вал з давачем, що виводилось на дисплей комп'ютера та свідчили про це. За отриманими даними побудовані графічні статичні залежності між обертовим моментом, деформацією та шириною порожнини шпонки, показані на рис. 4.

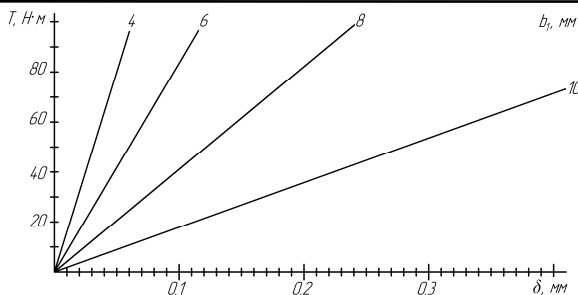


Рис. 4. Графічні статичні залежності між обертальним моментом, деформацією та шириною порожнини шпонки

Для створення різної частоти вимушеної сили F_e використані кулачки, відповідно: з одним виступом (рис. 5, а); з двома виступами (рис. 5, б) і з чотирма виступами (рис. 5, в).

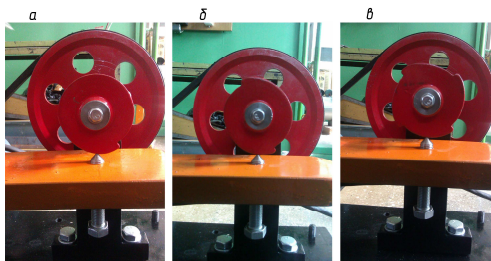


Рис. 5. Частина дослідного стенда для створення обертального моменту, який змінюється періодично впродовж тривалого часу: а – з кулачком з одним виступом; б – з кулачком з двома виступами; в – з кулачком з чотирма виступами

У додатковому обладнанні стенда використаний електродвигун марки АІР 71А-495 з потужністю $N_{де} = 0,55 \text{ кВт}$ і паспортною частотою обертання $n_{де} = 1360 \text{ об/хв}$, передаточне відношення клинопасової передачі $u_{кн} = 5,6$. Тому частота вимушеної сили F_e була: для кулачка з одним виступом $n_e = 242,8 \text{ об/хв}$; для кулачка з двома виступами $n_e = 485,6 \text{ об/хв}$. і кулачка з чотирма виступами $n_e = 971,2 \text{ об/хв}$.

Експеримент виконувався наступним чином. Початкове навантаження жорсткого або пружного шпонкового з'єднання здійснювалось за допомогою регульовального гвинта, що вгвинчений у важіль на плечі $l = 700 \text{ мм}$ і опирається у кулачок. Це показано на рис. 6, 7 і 8.

На рис. 6 показана схема деформації пружної призматичної шпонки у з'єднанні вала з маточиною. При повороті маточини відносно вала на кут φ від навантаження обертальним моментом шпонка деформується на величину δ .

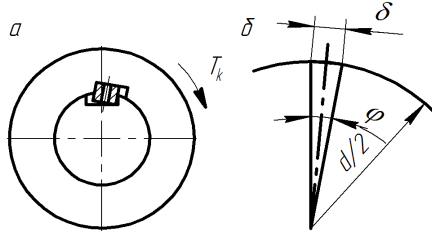


Рис. 6. Схема деформації пружної призматичної шпонки у з'єднанні: а – положення маточини відносно вала; б – зв'язок δ з d через кут φ

Для визначення деформації пружної призматичної шпонки у з'єднанні вала з маточиною використана схема подана на рис. 7, де графічно показаний зв'язок між кутовим переміщенням важеля 2, а разом з ним маточини 1. Вимірювання кутового переміщення важеля 2 виконується індикатором 3, показаним на рис. 7 і 8.

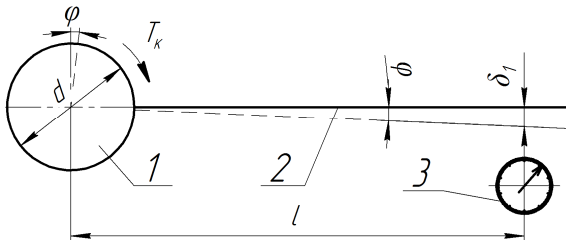


Рис. 7. Схема для визначення деформації пружної шпонки в залежності від повороту важеля

Експериментально деформація δ пружної призматичної шпонки знаходилась в залежності від δ_1 на основі пропорції, що

$$\frac{\delta_1}{l} = \frac{2\delta}{d}. \quad (1)$$

Звідки
$$\delta = \delta_1 \frac{d}{2l}, \text{ або } \delta = 0,042857\delta_1. \quad (2)$$

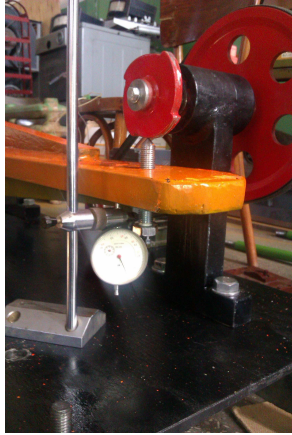


Рис. 8. Вимірювання переміщення важеля на стенді за допомогою індикатора

Далі вмикався електродвигун і кулачок створював на шпонковому з'єднанні обертальний момент, який змінюється періодично впродовж тривалого часу з частотою залежно від кількості виступів на кулачку, що виводилось на дисплей комп'ютера від тензорезисторного давача через тензометричну станцію та виражалось у вигляді осцилограм.

Зразки характерніших осцилограм показані на рис. 9, 10 і 11. Визначення обертального моменту і розшифровка отриманих осцилограм виконувалась за допомогою калібрувального графіка, як у [9].

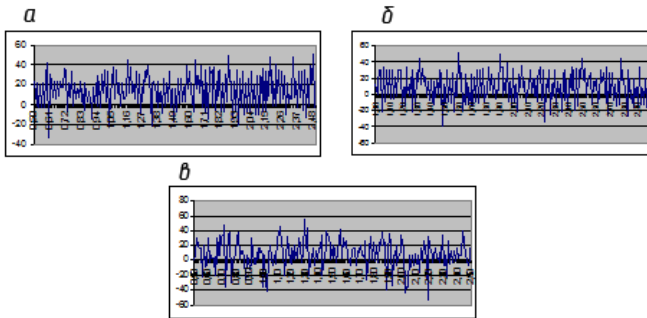


Рис. 9. Осцилограми для з'єднання з шпонкою при $b_1 = 6\text{мм}$ для кулачка з одним виступом при: $a - \delta_1 = 1\text{мм}$; $б - \delta_1 = 2\text{мм}$; $в - \delta_1 = 3\text{мм}$

Для порівняльної оцінки амортизаційних властивостей досліджуваних з'єднань були використані:

- коефіцієнт динамічності

$$k_o = \frac{T_o}{T_c}, \quad (3)$$

де T_o – обертальний момент, створений кулачком; T_c – обертальний момент, створений статичним навантаженням важеля, взятий із графіка на рис. 4.

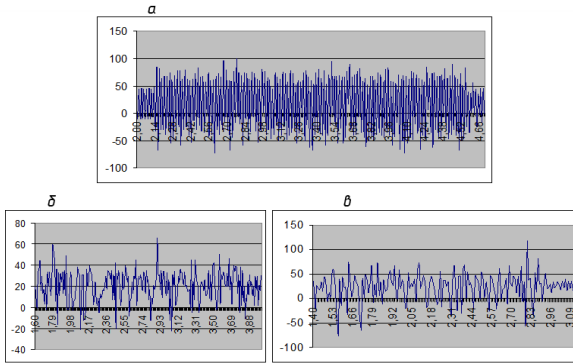


Рис. 10. Зразки осцилограм для з'єднання з шпонкою при $b_1 = 6\text{мм}$ для кулачка з двома виступами при: а - $\delta_1 = 1\text{мм}$; б - $\delta_1 = 2\text{мм}$; в - $\delta_1 = 3\text{мм}$

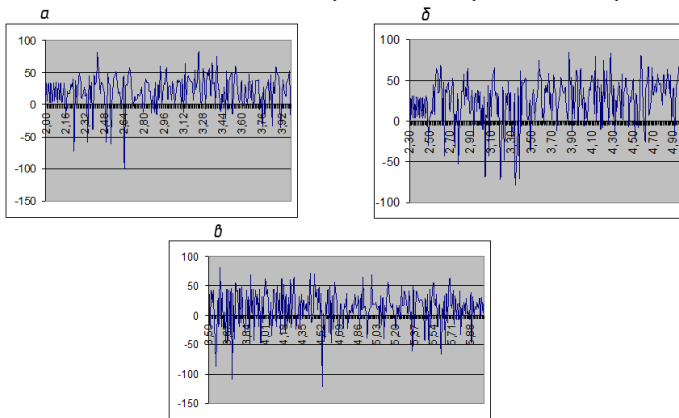


Рис. 11. Зразки осцилограм для з'єднання з шпонкою при $b_1 = 6\text{мм}$ для кулачка з чотирма виступами при: а - $\delta_1 = 1\text{мм}$; б - $\delta_1 = 2\text{мм}$; в - $\delta_1 = 3\text{мм}$

Оброблені за допомогою калібрувального графіку отримані осцилограми дозволили визначити значення T_o , а далі за допомогою виразу (3) коефіцієнти динамічності k_o в залежності від δ і відношення b_1/b .

Отримані значення коефіцієнтів динамічності k_δ для вказаних з'єднань з жорсткою і пружними шпонками зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів динамічності K_δ

b_1/b	Значення коефіцієнтів динамічності K_δ , при δ , мм				
	0,042857	0,085714	0,128571	0,171428	0,214285
0	1,98	2,52	2,96	3,25	3,45
0,22	1,74	2,30	2,63	2,89	3,04
0,33	1,53	2,10	2,40	2,52	2,56
0,44	1,36	1,86	2,11	2,20	2,21
0,56	1,29	1,63	1,74	1,80	1,83

Маючи значення коефіцієнтів динамічності для жорсткого з'єднання і для пружних шпонкових з'єднань в залежності від обертового моменту T і b_1/b , визначались коефіцієнти амортизації

$$k_a = \frac{K_{\text{дпу}}}{K_{\text{джш}}}, \quad (4)$$

де $K_{\text{дпу}}$ – коефіцієнт динамічності пружного шпонкового з'єднання;

$K_{\text{джш}}$ – коефіцієнт динамічності жорсткого шпонкового з'єднання.

Отримані значення коефіцієнтів амортизації K_a для вказаних з'єднань з жорсткою і пружними шпонками зведені в табл. 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів амортизації K_a

b_1/b	Значення коефіцієнтів амортизації K_a , при δ , мм				
	0,042857	0,085714	0,128571	0,171428	0,214285
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,22	0,91	0,89	0,88	0,87	0,86
0,33	0,82	0,80	0,78	0,76	0,74
0,44	0,73	0,72	0,70	0,68	0,64
0,56	0,67	0,65	0,61	0,57	0,53

На основі отриманих результатів, що наведені в табл. 1 і 2, побудовані графічні залежності коефіцієнтів динамічності k_δ (рис. 11, а) і амортизації k_a (рис. 11, б).

Із графічної залежності (рис. 12, а) видно, що зі збільшенням відношення b_1/b коефіцієнт динамічності зменшується, а по мірі збільшення навантаження інтенсивність збільшення коефіцієнта динамічності ослабляється.

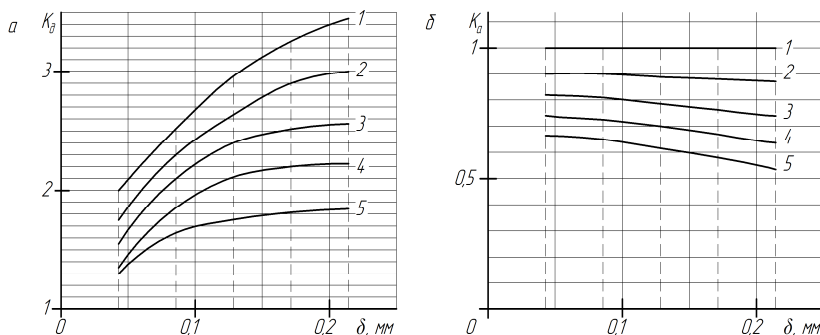


Рис. 12. Графічні залежності коефіцієнтів: *a* – динамічності k_d і *б* – амортизації k_a ; 1 – для жорсткої шпонки; 2, 3, 4 і 5 – для пружних шпонок, відповідно з $b_1 = 4, 6, 8$ і 10 мм

Із графічної залежності (рис. 12, *б*) видно, що зі збільшенням відношення b_1/b коефіцієнт амортизації зменшується, а по мірі збільшення навантаження зменшується дуже незначно.

Висновки. За результатами експериментальних досліджень пружних шпонкових з'єднань навантажених довготривалим періодичним обертальним моментом можна зробити наступні висновки.

1. Результати проведених експериментальних досліджень підтвердили теоретичні положення отримані для пружних призматичних шпонок при передачі ними періодично змінного обертального моменту без врахування втрат на тертя. Підтвердили можливість виникнення резонансу при відповідних частотах вимушеної сили і жорсткості пружних призматичних шпонок з округленими торцями і такою за обрисом порожниною. Це потрібно враховувати при проектуванні пружних шпонкових з'єднань.

2. Пружні шпонкові з'єднання у порівнянні з жорсткими знижують динамічність навантаження у приводах зменшенням амплітуди коливань їх мас.

3. За даними попередніх дослідів пружні шпонкові з'єднання зберігають стабільність несучої здатності в умовах довготривалого динамічного навантаження.

4. Незначний поворот вала відносно маточини або навпаки під дією динамічного навантаження суттєво підвищує ефект амортизації та демпфування, не викликає спрацювання поверхонь сполуки вал-маточина і не знижує несучої здатності з'єднання. Під час значних перевантажень за рахунок деформації пружної шпонки запобігаються деталі від поломок.

- 1.** Малащенко В. О. Деталі машин. Збірник завдань та прикладів розрахунків [Текст] / В. О. Малащенко, В. Т. Павлице. – Львів : Новий Світ-2000, 2011. – 216 с.
- 2.** Пат. 52014 Україна, МПК F 16 В 3/00. Пружна призматична шпонка [Текст] / Стрілець О. Р., Малащенко В. О., Стрілець В. М.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у № 201001578; заявл. 15.02.10; опубл. 10.08.10, Бюл. № 15, 2010 р.
- 3.** Пат. 56071 Україна, МПК F 16 В 3/00. Пружна призматична шпонка [Текст] / Стрілець О. Р., Малащенко В. О., Стрілець В. М.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у № 201007432; заявл. 14.06.10; опубл. 27.12.10, Бюл. № 24, 2010 р.
- 4.** Пат. 56666 Україна, МПК F 16 В 3/00. Пружна призматична шпонка [Текст] / Стрілець О. Р., Малащенко В. О., Стрілець В. М.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у № 201007393; заявл. 14.06.10; опубл. 25.01.11, Бюл. № 2, 2011 р.
- 5.** Пат. 61951 Україна, МПК F 16 В 3/00. Пружна призматична шпонка [Текст] / Стрілець О. Р., Малащенко В. О., Стрілець В. М.; заявники і власники патенту Національний університет водного господарства та природокористування і Національний університет «Львівська політехніка». – у № 201014574; заявл. 06.12.10; опубл. 10.08.11, Бюл. № 15, 2011 р.
- 6.** Пат. 62872, Україна, МПК F 16 В 3/00. Пружна призматична шпонка [Текст] / Стрілець О. Р., Малащенко В. О., Стрілець В. М.; заявники і власники патенту Національний університет водного господарства та природокористування і Національний університет «Львівська політехніка». – у № 201014575; заявл. 06.12.10; опубл. 26.09.11, Бюл. № 18, 2011 р.
- 7.** Малащенко В. О. Динамічні характеристики пружних шпонкових з'єднань типу вал – маточина [Текст] / В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець // Вісник НТУ „ХП”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск „Проблеми механічного приводу”. – Харків : НТУ „ХП”. – 2011, № 28. – С. 92-99.
- 8.** Малащенко В. О. Динамічні властивості пружних шпонкових з'єднань з урахуванням втрат енергії на тертя [Текст] / В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець // Вісник Національного університету „Львівська політехніка”. „Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”. – Львів : НУ „Львівська політехніка”. – 2012, № 730. – С. 73-80.
- 9.** Стрілець О. Р. Амортизаційні і демпфуючі властивості пружних шпонкових з'єднань [Текст] / О. Р. Стрілець // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки. Збірник наукових праць. – Вип. 1(57) – Рівне : НУВГП, 2012. – С. 118-124.
- 10.** Пат. 2094763 Росія, МПК G 01 М 13/00. Стенд для испытаний упругих призматических шпонок [Текст] / Стрелец В. Н.; заявитель и обладатель патента Стрелец Владимир Николаевич. – № 5004124/28; заявл. 07.08.91; опубл. 27.10.97, Бюл. № 30, 1997 г.
- 11.** Пат. 62303A Україна, МПК G 01 М 13/00. Стенд для випробувань пружних призматичних шпонок [Текст] / Стрілець В. М., Костюк О. П., Панчук Р. Т.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – № 200312119; заявл. 03.03.03; опубл. 15.12.03, Бюл. № 12, 2003 р.
- 12.** Пат. 50704 Україна, МПК G 01 М 13/00. Стенд для дослідження пружних шпонкових з'єднань [Текст] / Стрілець О. Р., Малащенко В. О., Стрілець В. М.; заяв-

ник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – и № 200912119; заявл. 25.11.09; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12, 2010 р.

Рецензент: д.т.н., професор Кованько В. В. (НУВГП)

Malaschenko V. O., Doctor of Engineering, Professor, Strilets O. R., Post-graduate Student (Lviv Polytechnic National University),
Strilets V. M., Candidate of Engineering, Associate Professor (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE DYNAMICS OF THE RESILIENT KEYS CONNECTIONS LOADED PERIODICALLY

Methods of experimental research of the resilient keys connections loaded periodically are described and conclusions comparing resilient and rigid keys connections are made.

Keywords: resilient key connections, experiment, periodical loading.

Малашенко В. О., д.т.н., професор, Стрилец О. Р., аспирант (Национальный университет “Львовская политехника»),
Стрилец В. Н., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ УПРУГИХ ШПОНОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

Описана методика экспериментальных исследований динамики шпоночных соединений при периодической нагрузке и сделаны соответствующие выводы в сравнении с жёсткими шпоночными соединениями.

Ключевые слова: упругие шпоночные соединения, эксперимент, периодическая нагрузка.
