

В. О. МАЛАЩЕНКО, О. Р. СТРИЛЕЦЬ

Національний університет «Львівська політехніка»

В. М. СТРИЛЕЦЬ

Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРУЖНИХ ШПОНКОВИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ УДАРНОМУ КОРОТКОЧАСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ БЕЗ УРАХУВАННЯ СИЛ ТЕРТЯ

*В роботі описані засоби і методика проведення експериментальних досліджень динаміки пружних шпонкових з'єднань коли навантаження після різкого збільшення зберігається протягом малого часу. На основі отриманих результатів для пружних шпонкових з'єднань зроблені відповідні висновки у порівнянні з жорсткими з'єднаннями.*

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

V. O. MALASCHENKO, O. R. STRILETS

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

V. M. STRILETS

National University of Water Management And Nature Resources Use, Rivne, Ukraine

### EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE DYNAMICS OF THE RESILIENT KEYED JOINTS WITH SHORT-TERM SHOCK LOADING WITHOUT CONSIDERATION OF FRICTION

*Abstract – The aim of the research is to explore the dynamics of the resilient keyed joints which are used to connect various rotational elements during the transmitting of the short-term shock loading without consideration of friction.*

*The shaft-hub connection due to resilient keys transmits the torque by the forces of such keys deformation, which leads to dynamic loadings absorption in process. The experimental data described are obtained on the specifically purposed manufactured stand by the method developed by authors.*

*Based on this data obtained for both resilient and rigid keyed joints we concluded that first comparing to second significantly reduce dynamical loading and their bad influence on drive durability.*

*Key words: resilient key connections, experiment, short-term loading.*

#### 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.

#### Мета роботи

Метою роботи є проведення експериментальних досліджень динаміки пружних шпонкових з'єднань, що застосовуються для з'єднання різноманітних деталей обертового руху під час передачі ними ударного короткотривалого 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 показана на рис. 1, в якій 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 в залежності від виду навантаження. Вимірювання деформацій і коливань 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.

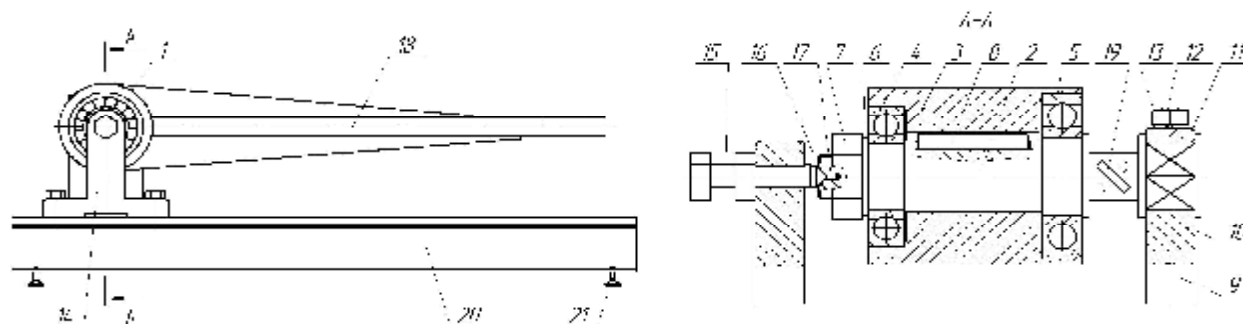


Рис. 1. Схема загальної частини стенда для експериментального дослідження шпонкових з'єднань

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

Для виконання дослідження шпонкових з'єднань, навантаження яких після різкого збільшення залишається незмінним на протязі малого часу, над другим кінцем важеля 18 розміщений копровий пристрій 22 (рис.2), який складається з падаючого вантажу 23, встановленого на вертикально рухомій каретці 24, що взаємодіє з направляючими 25, закріпленими на рамі 20. Максимальна маса падаючого вантажу дорівнює 50 кг. Рухома каретка утримується за допомогою зачепа 26, встановленого на поперечині 27 у верхньому положенні. Для підйому падаючого вантажу 23 з важеля 18, стенд обладнано додатковими пружинами 28 і защіпками 29.

Під час налагодження стенду рухому каретку 24 з вантажем 23 піднімають і закріплюють на зачепі 26, а вертикально рухомі пружини 28 стискають і фіксують защіпками 29. Стенд для випробувань шпонкового з'єднання підготовлений до роботи.

Дослідження шпонкового з'єднання 1 тепер виконують наступним чином. Рухому каретку 24 звільняють від зачепа 26 і вантаж 23 падає на важіль та створює динамічне навантаження, яке передається на шпонкове з'єднання 1. Одночасно під час удару по важелю 18 рухома каретка 24 з падаючим вантажем 23 взаємодіє з защіпками 29, звільняючи стиснуті вертикально рухомі пружини 28, які розправляючись, піднімають вертикально рухому каретку 24 з падаючим вантажем 23 догори і розвантажують важіль 18.

Діаметр споуки вал-маточина  $d = 60$  мм, а пружні призматичні шпонки (рис. 3, а) мають 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.

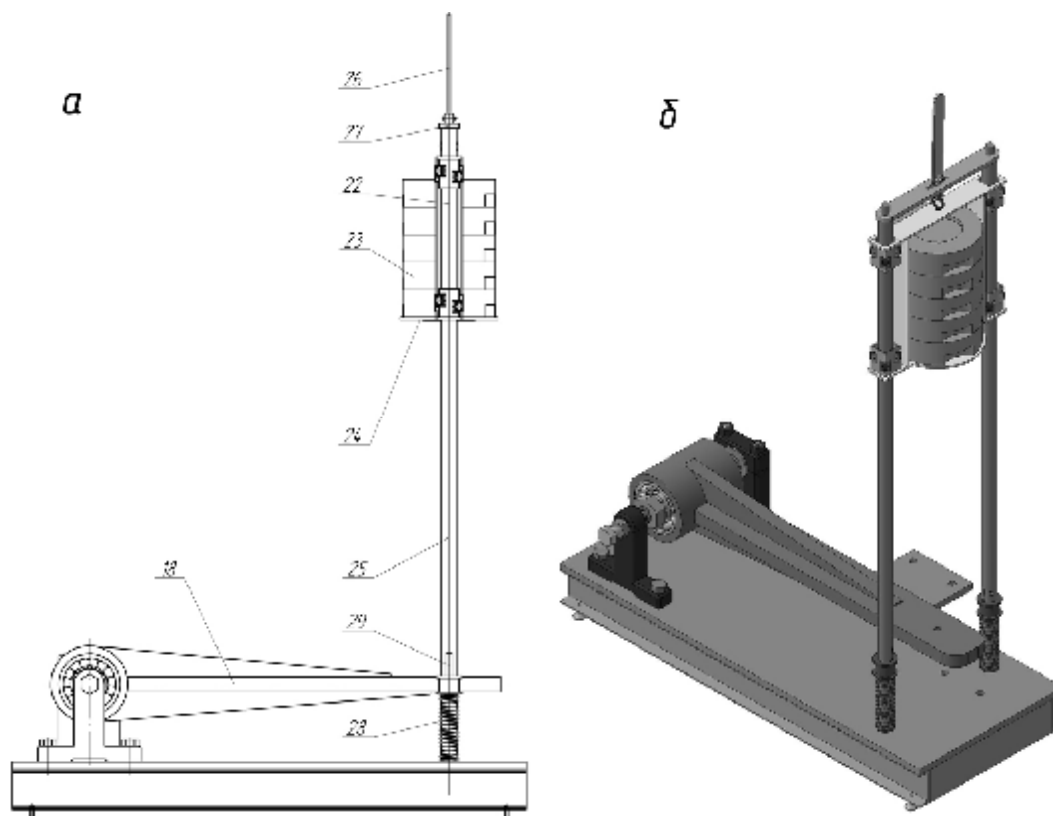


Рис. 2. Стенд з обладнанням коли навантаження після різкого збільшення залишається незмінним на протязі малого часу: а – кінематична схема; б – загальний вигляд дослідної моделі

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).

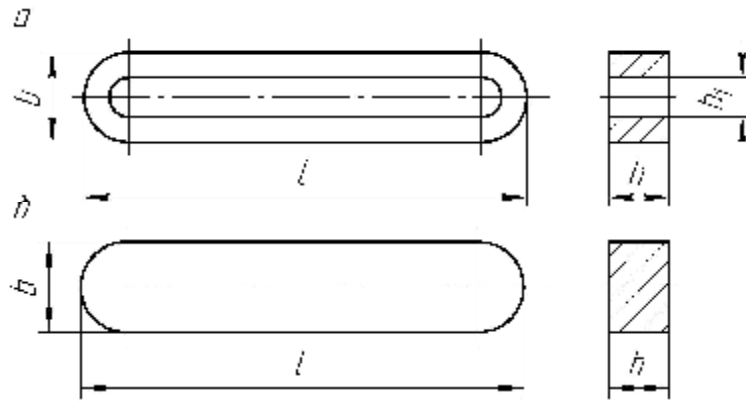


Рис. 3. Призматичні шпонки: а – пружна; б – жорстка

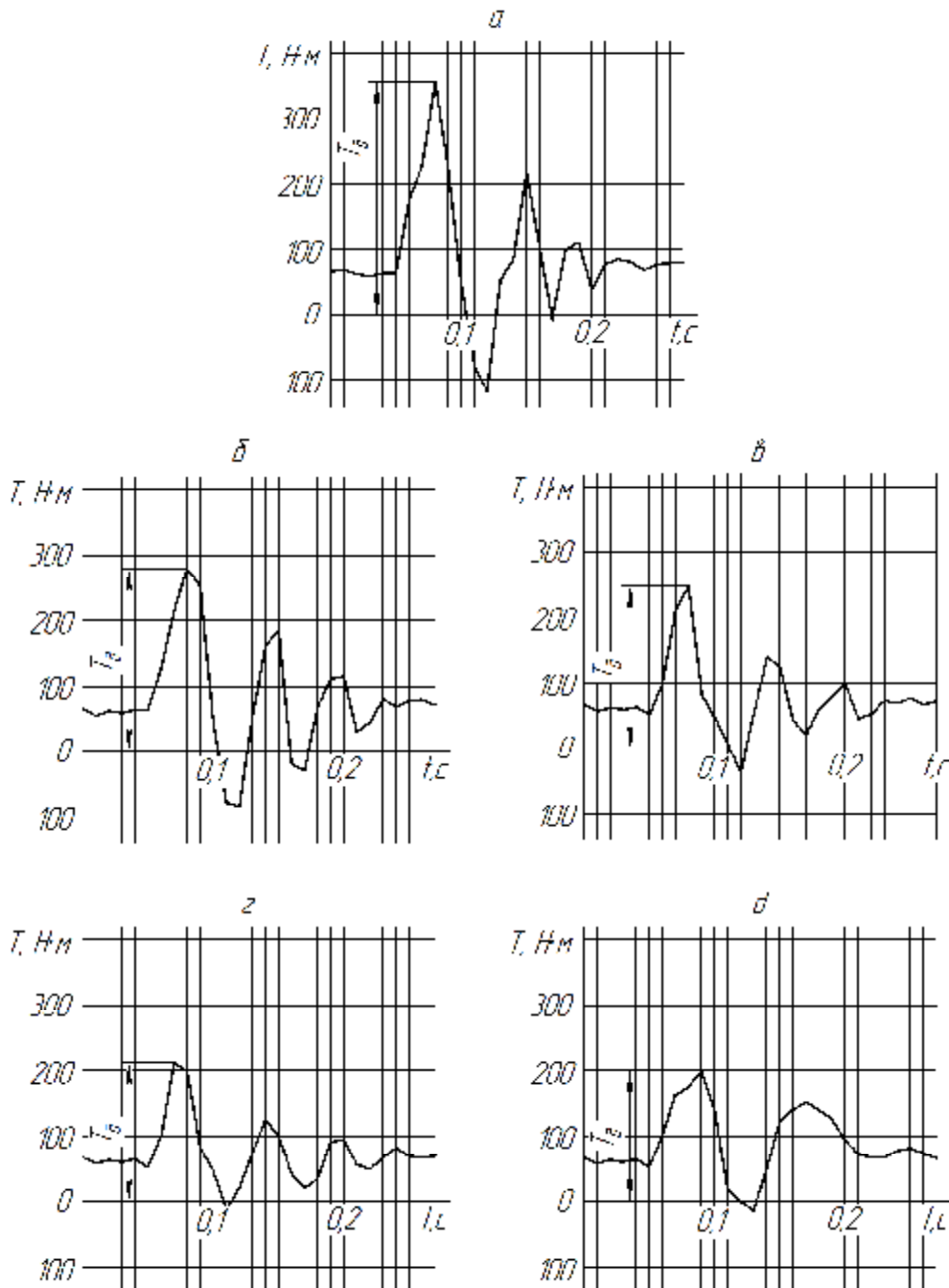


Рис. 4. Зразки ділянок осцилограм з максимальними амплітудами коливань: а – для з'єднання з жорсткою шпонкою; б, в, г – для з'єднання з пружними шпонками, де, відповідно:  $b_1 = 6, 8, 10$  і  $12$  мм при  $F_g = 100$  Н

Для визначення статичного обертового моменту на важіль встановлюється вантаж  $F_{ig}=100; 200; 300; 400; 500 \text{ Н}$ . Довжина плеча установавання цих вантажів  $l_{Fg}=700 \text{ мм}$ , а довжина плеча до центра маси важеля  $l_{Fg}=240 \text{ мм}$ . Тоді створені цими вантажами статичні обертові моменти будуть відповідно: 156, 226, 296, 366 і 436 Н·м.

Обертові динамічні моменти  $T_d$ , створені падінням вказаних вантажів з прийнятої висоти  $H = 700 \text{ мм}$  у вигляді осцилограм записувались за допомогою тензометричної станції ТС-8 від дровових тензометричних давачів, встановлених на валу, як вказано у [9].

Зразки характерніших осцилограм для жорсткої і пружних шпонок для  $F_g=100 \text{ Н}$  показані на рис.4.

Розшифровка отриманих осцилограм і визначення статичних обертових моментів  $T_c$  залежно від розмірів шпонки виконувалась за допомогою калібрувального графіка, показаного на рис. 5, отриманого за допомогою тензорезисторного давача і тензометричної станції ТС-8.

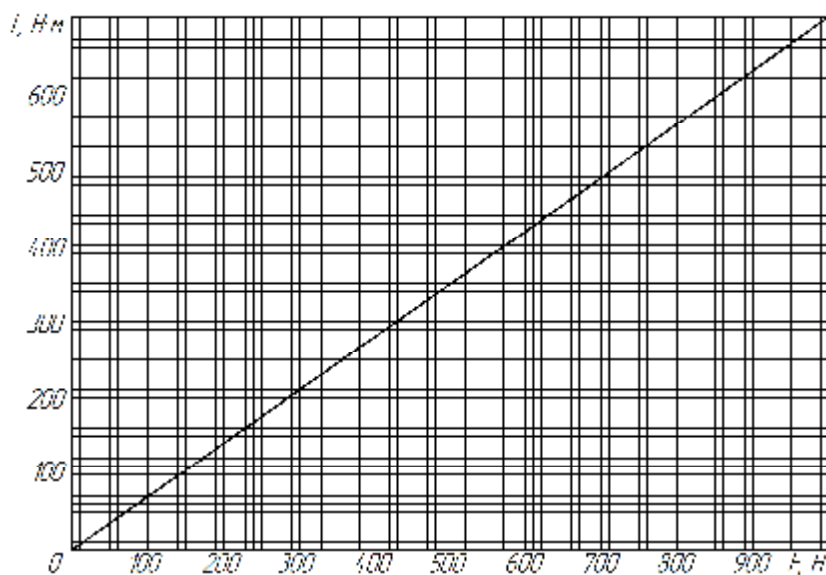


Рис. 5. Калібрувальний графік

Для порівняльної оцінки динамічних властивостей досліджуваних з'єднань використаний коефіцієнт динамічності

$$k_d = \frac{T_d}{T_c}, \quad (1)$$

де  $T_d$  – обертовий момент, створений падінням вантажу  $F_g$  з деякої висоти  $H=700\text{мм}$ ;  $T_c$  – обертовий момент, створений статичним навантаженням важеля вантажем  $F_c=F_g+F_g$ , де  $F_g = 400 \text{ Н}$  – сила створена масою важеля.

Оброблені за допомогою калібрувального графіку отримані осцилограми дозволили визначити значення  $T_d$ , а далі за допомогою виразу (1) коефіцієнти динамічності  $k_d$  в залежності від  $F_g$  і відношення  $b_1/b$ .

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

Таблиця 1

**Значення коефіцієнтів динамічності  $K_d$ ,**

$b_1/b$	Значення коефіцієнтів динамічності $K_d$ , при $F_g, \text{ Н}$				
	100	200	300	400	500
0	2,11	2,82	3,20	3,39	3,51
0,33	1,90	2,63	2,89	2,96	3,02
0,44	1,72	2,31	2,52	2,61	2,64
0,56	1,49	1,89	2,21	2,28	2,30
0,67	1,32	1,59	1,70	1,88	1,92

Маючи значення коефіцієнтів динамічності для жорсткого і пружних шпонкових з'єднань в залежності від  $F_g$  і  $b_1/b$ , визначені коефіцієнти амортизації за допомогою виразу .

$$k_a = \frac{K_{dти}}{K_{dжи}}, \quad (2)$$

де  $K_{дони}$  – коефіцієнт динамічності пружного шпонкового з'єднання;  $K_{джси}$  – 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 $F_g, H$				
	100	200	300	400	500
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,33	0,88	0,89	0,88	0,87	0,86
0,44	0,78	0,78	0,77	0,76	0,75
0,56	0,70	0,69	0,68	0,67	0,65
0,67	0,62	0,61	0,61	0,59	0,58

На основі отриманих результатів, що наведені в табл. 1 і 2, побудовані графічні залежності коефіцієнтів динамічності  $k_d$  (рис. 6, а) і амортизації  $k_a$  (рис. 6, б).

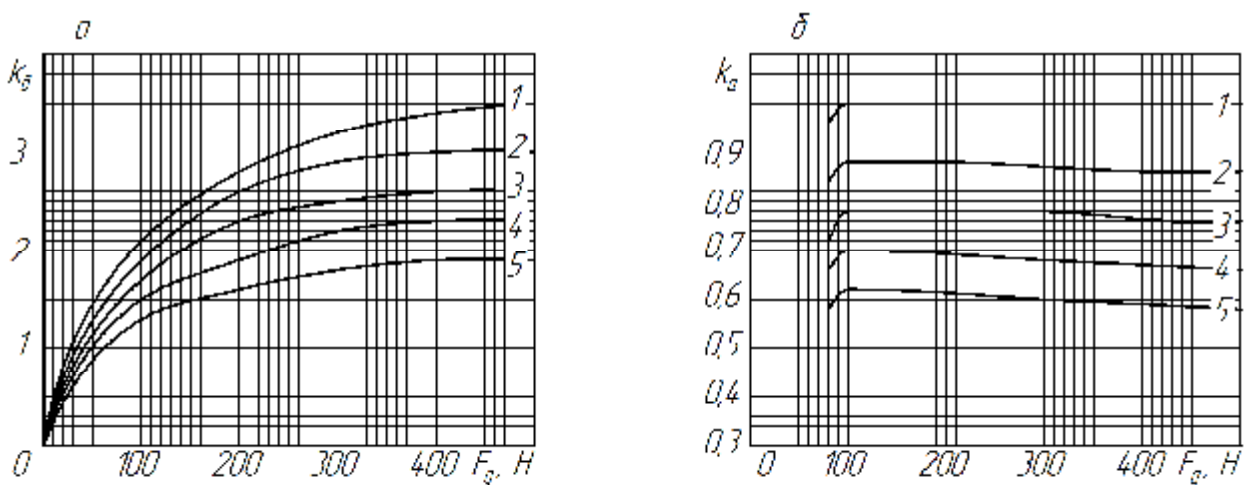


Рис. 6. Графічні залежності коефіцієнтів: а - динамічності  $k_d$  і б - амортизації: 1 - для жорсткої шпонки; 2, 3, 4 і 5 - для пружних шпонок, відповідно з  $b_1/b = 6, 8, 10$  і  $12$  мм

Із графічної залежності (рис. 4,а) видно, що зі збільшенням відношення  $b_1/b$  коефіцієнт динамічності зменшується, а по мірі збільшення навантаження інтенсивність збільшення коефіцієнта динамічності ослабляється.

Із графічної залежності (рис. 4,б) видно, що зі збільшенням відношення  $b_1/b$  коефіцієнт амортизації зменшується, а по мірі збільшення навантаження зменшується дуже незначно.

Демпфуючі властивості пружних і жорстких шпонкових з'єднань оцінювались коефіцієнтом демпфування.

$$D = \frac{1}{2p} \ln \frac{T_{n+1}}{T_n}, \quad (3)$$

де  $T_n$  і  $T_{n+1}$  - величини двох сусідніх ( $n$  і  $n+1$ ) амплітуд затухаючих коливань обертальних моментів.

Значення  $T_n$  і  $T_{n+1}$  взяті із отриманих осцилограм (рис.2). Наприклад, для з'єднання жорсткою шпонкою ( $b_1/b=0$ ) із осцилограми (рис. 2, а),  $T_n=350$  Н·м,  $T_{n+1}=215$  Н·м. Тоді за (3) дістанемо

$$D = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \ln \frac{215}{350} = 0,08.$$

Такі розрахунки проведені для всіх вказаних з'єднань з пружними шпонками та на їх основі побудовані залежності коефіцієнта демпфування  $D$  від  $F_g$  (рис. 7, а) і  $D$  від  $b_1/b$  (рис. 7, б).

Із графічних залежностей (рис. 7, а) видно, що коефіцієнт демпфування не залежить від  $F_g$ , а зі збільшенням відношення  $b_1/b$  коефіцієнт демпфування збільшується (рис. 7, б).

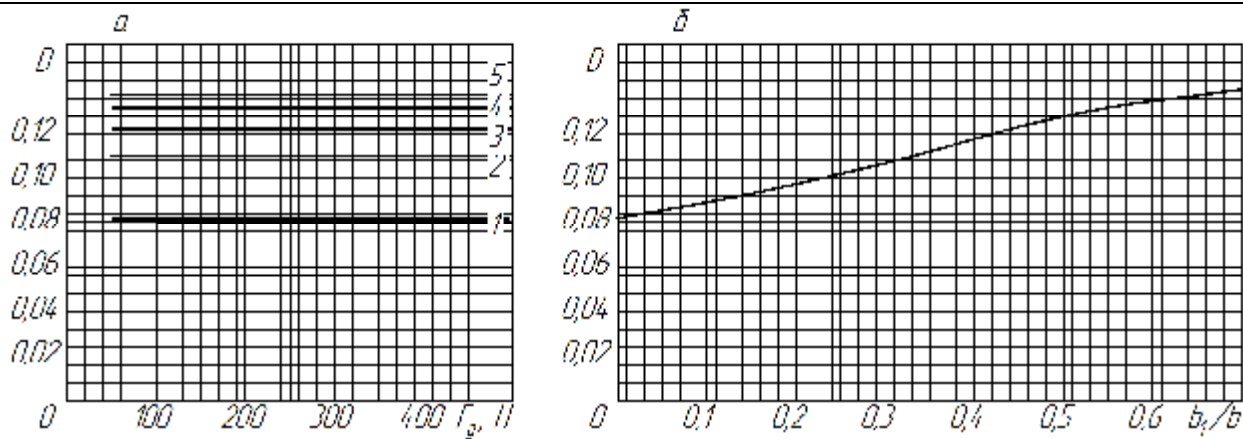


Рис. 7. Графічна залежність коефіцієнта демпфування  $D$ : а – залежно від  $F_g$ ; 1 – для жорсткої шпонки; 2, 3, 4 і 5 – для пружних шпонок, відповідно з  $b_1 = 6, 8, 10$  і  $12$  мм; б – залежно від  $b_1/b$

### Висновки

За результатами експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки.

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

При номінальних силових параметрах коефіцієнт амортизації пружних шпонкових з'єднань  $k_a = 0,6 \dots 0,7$ , а коефіцієнт демпфування  $D$  у  $1,5 \dots 2,0$  рази більший, ніж у жорстких шпонкових з'єднаннях.

2. За даними попередніх дослідів пружні шпонкові з'єднання зберігають стабільність несучої здатності в умовах ударного короткотривалого динамічного навантаження.

### Література

1. Малащенко В. О. Деталі машин. Збірник завдань та прикладів розрахунків / В. О. Малащенко, В. Т. Павлище. – Львів : Новий Світ – 2000, 2011. – 216 с.
2. Пат. 52014 Україна, МПК F 16 В 3/00. Пружна призматична шпонка / О. Р. Стрілець, В. О. Малащенко, В. М. Стрілець ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u №201001578 ; заявл. 15.02.2010 ; опубл. 10.08.2010 ; Бюл. №15.
3. Пат. 56071 Україна, МПК F 16 В 3/00. Пружна призматична шпонка / О. Р. Стрілець, В. О. Малащенко, В. М. Стрілець ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u №201007432 ; заявл. 14.06.2010 ; опубл. 27.12.2010 ; Бюл. №24.
4. Пат. 56666 Україна, МПК F 16 В 3/00. Пружна призматична шпонка / О. Р. Стрілець, В. О. Малащенко, В. М. Стрілець ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u №201007393 ; заявл. 14.06.2010 ; опубл. 25.01.2011 ; Бюл. №2.
5. Пат. 61951 Україна, МПК F 16 В 3/00. Пружна призматична шпонка / О. Р. Стрілець, В. О. Малащенко, В. М. Стрілець ; заявники і власники патенту Національний університет водного господарства та природокористування і Національний університет «Львівська політехніка». – u №201014574 ; заявл. 06.12.2010 ; опубл. 10.08.2011 ; Бюл. №15.
6. Пат. 62872, Україна, МПК F 16 В 3/00. Пружна призматична шпонка / О. Р. Стрілець, В. О. Малащенко, В. М. Стрілець ; заявники і власники патенту Національний університет водного господарства та природокористування і Національний університет «Львівська політехніка». – u №201014575 ; заявл. 06.12.2010 ; опубл. 26.09.2011 ; Бюл. №18.
7. Малащенко В. О. Динамічні характеристики пружних шпонкових з'єднань типу вал-маточина / В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець // Вісник НТУ „ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск „Проблеми механічного приводу”. – Харків : НТУ „ХПІ”. – 2011. – № 28. – С. 92–99.
8. Малащенко В. О. Динамічні властивості пружних шпонкових з'єднань з урахуванням втрат енергії на тертя / 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 / О. Р. Стрілець // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки. – 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 / В. Н. Стрелец ; заявитель и обладатель патента Стрелец Владимир Николаевич. – №5004124/28 ; заявл. 07.08.1991 ; опубл. 27.10.1997 ; Бюл. №30.
11. Пат. 62303А Україна, МПК G 01 М 13/00. Стенд для випробувань пружних призматичних шпонок / В. М. Стрілець, О. П. Костюк, Р. Т. Панчук ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – №200312119 ; заявл. 03.03.2003 ; опубл. 15.12.2003 ; Бюл.

№12.

12. Пат. 50704 Україна, МПК G 01 M 13/00. Стенд для дослідження пружних шпонкових з'єднань / О. Р. Стрілець, В. О. Малащенко, В. М. Стрілець ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u №200912119 ; заявл. 25.11.2009 ; опубл. 25.06.2010 ; Бюл. №12.

## References

- 1.1. Malaschenko V. O., Pavlyshe V. T. Detali mashyn. Zbirnyk zavdan ta prykladiv rozrahunkiv [Text]. Lviv, Novyj Svit, 2000, 2011. – 216 p. [in Ukrainian].
2. Pat. 52014 Ukraine. MPK F 16 B 3/00. Pruzhna pryzmatychna shponka / O. R. Srilets, V. O. Malaschenko, V. M. Strilets – u No. 201001578; Zajavl. 15.02.2010; Opubl. 10.08.2010; Biul. No.15. [in Ukrainian].
3. Pat. 56071 Ukraine. MPK F 16 B 3/00. Pruzhna pryzmatychna shponka / O. R. Srilets, V. O. Malaschenko, V. M. Strilets – u No. 201007432; Zajavl. 14.06.2010; Opubl. 27.12.2010; Biul. No.24. [in Ukrainian].
4. Pat. 56666 Ukraine. MPK F 16 B 3/00. Pruzhna pryzmatychna shponka / O. R. Srilets, V. O. Malaschenko, V. M. Strilets – u No. 201007393; Zajavl. 14.06.2010; Opubl. 25.01.2011, Biul. No.2. [in Ukrainian].
5. Pat. 61951 Ukraine. MPK F 16 B 3/00. Pruzhna pryzmatychna shponka / O. R. Srilets, V. O. Malaschenko, V. M. Strilets – u No. 201014574; Zajavl. 06.12.2010; Opubl. 10.08.2011; Biul. No.15. [in Ukrainian].
6. Pat. 62872 Ukraine. MPK F 16 B 3/00. Pruzhna pryzmatychna shponka / O. R. Srilets, V. O. Malaschenko, V. M. Strilets – u No. 201014575; Zajavl. 06.12.2010; Opubl. 26.09.2011; Biul. No.18. [in Ukrainian].
7. Malaschenko V. O., Strilets O. R., Strilets V. M. Dynamichni kharakterystyky pruzhnykh shponkovykh zjednan typu val-matochyna, Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh prats. Tematychnyj vypusk “Problemy mekhanichnogo pryvodu”, Kharkiv, NTU “KhPI”, 2011, No. 28. – pp. 92-99. [in Ukrainian].
8. Malaschenko V. O., Strilets O. R., Strilets V. M. Dynamichni vlastyvyty pruzhnykh shponkovykh zjednan z urakhuvannam vrat enerhii na tertya, Visnyk Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnika”. “Dynamika, mitsnist ta proektuvannya mashyn i tykladiv, Lviv, NU “Lvivska politekhnika”, 2012, No. 730. – pp. 73-80. [in Ukrainian].
9. Strilets O. R. Amortyzatsijni I dempfujuchi vlastyvyty pruzhnykh shponkovykh zjednan, Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho gospodarstva ta pryrodokorystuvannya. Tekhnichni nauky. Zbirnyk naukovykh prats, Rivne, NUVHP, 2012, No. 1(57). – pp. 118-124. [in Ukrainian].
10. 10. Pat. 2094763 Россия, МПК G 01 M 13/00. Stend dlya ispytaniya yprugih prizmaticheskikh shponok / V. N. Strelets – No. 5004124/28; Zajavl. 07.08.1991; Opubl. 27.10.1997; Biul. No. 30. [in Russian].
11. 11. Pat. 62303A Ukraine. MPK G 01 M 13/00. Stend dlya vyprobuvan pruzhnykh pryzmatychnykh shponok / V. M. Strilets, O. P. Kostyuk, R. T. Panchuk. – No. 200312119; Zajavl. 03.03.2003; Opubl. 15.12.2003; Biul. No. 12. [in Ukrainian].
12. Pat. 50704 Ukraine. MPK G 01 M 13/00. Stend dlya doslidzhennya pruzhnykh shponkovykh zjednan / O. R. Srilets, V. O. Malaschenko, V. M. Strilets. – u No. 200912119; Zajavl. 25.11.2009; Opubl. 25.06.2010; Biul. No. 12. [in Ukrainian].

Рецензія/Peer review : 22.5.2013 р.

Надрукована/Printed : 16.6.2013 р.

Рецензент: д.т.н., професор Кравець С.В. (завідувач кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних машин та обладнання Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне).