

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 621. 874

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОВЕДЕННЯ ТАРИРОВКИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ
У КОМПЛЕКСІ З ВИМІРЮВАЛЬНИМ ОБЛАДНАННЯМ**

Доктори техн. наук Н. М. Фідровська, Р. В. Пономаренко,
кандидати техн. наук Є. Д. Слепужніков, Д. С. Козодой

**JUSTIFICATION OF TENSORISTOR CALIBRATION IN A COMPLEX WITH
MEASURING EQUIPMENT**

D. Sc. (Tech.) N. Fidrovska, D. Sc. (Tech.) R. Ponomarenko,
PhD (Tech.) E. Slepuzhnikov, PhD (Tech.) D. Kozodoi

Анотація. У статті розглянуто процес проведення тарировки тензорезисторів та вимірювального обладнання. Проведення експериментальних досліджень методом тензометрії – дуже важливе завдання в режимі реального часу. Але для такого дослідження необхідно відкалібрувати тензодатчики. Калібрування необхідно виконати для визначення функціонального взаємозв'язку між навантаженням, що діє на деталь, яку буде випробувано, і вихідним сигналом обладнання.

Ключові слова: тарировка, тензорезистор, навантаження, електротензометрія, вантаж.

Abstract. The article describes the process of calibrating strain gauge and measuring equipment. Modern machines have a complex design of the shapes of parts and assemblies. The loads acting on them often do not allow the determination of the stress state by modeling or calculation when creating these structurally complex machines. Therefore, conducting experimental studies using the strain gauge method is an extremely important task in real time. But for such a study, it is necessary to calibrate the strain gauges. Calibration must be performed to determine the functional relationship between the load applied to the part to be tested and the equipment output. Depending on the size, as well as the configuration and other features of the investigated part, several methods of calibration of strain gages are used: direct and indirect. To obtain reliable measurement results, the calibration conditions should differ as little as possible from the conditions of experimental studies of the tested parts.

Calibration must be performed to determine the functional relationship between the load applied to the part to be tested and the equipment output. Depending on the size, as well as the configuration and other features of the investigated part, several methods of calibration of strain gages are used: direct and indirect. To obtain reliable measurement results, the calibration conditions should differ as little as possible from the conditions of experimental studies of the tested parts.

Calibration consists in finding a functional relationship between the load acting on the tested part and the output signal of the equipment. To do this, creating previously known loads on the part

on which the strain gauges are glued, and comparing the value of these loads with the intensity of the output signal, their ratio is determined analytically or graphically.

Electrotensometry uses bridge and half-bridge measurement circuits. The half-bridge circuit is widely used, especially in static processes, where one strain gauge is active, and the other is located in the area of the load and is used for temperature compensation.

Keywords: calibration, strain gauge, tension, electrical strain gauge, cargo.

Вступ. Деталі машин протягом експлуатаційного циклу та в процесі зберігання, разом із зношуванням, схильні до таких видів руйнувань і пошкоджень: механічні, електрохімічні (корозійні) та ін. Механічні види руйнування і пошкодження виявляються у вигляді тріщин, полумок, про-боїн, деформацій, втрати пружності [1, 2].

Тріщини і полумки деталей з'являються внаслідок тривалого впливу навантажень змінного характеру, що повторюються у часі та викликають в результаті втомні руйнування. Мікроскопічні тріщини, які виникають на поверхні деталі в початковому етапі, в подальшому прогресують та проникають вглиб деталі, при цьому охоплюючи більшу частину її перетину. Якщо такий стан залишається не поміченим вчасно, така деталь неминуче руйнується [3]. Такий різновид полумок характерний для осей, валів, шатунів, шатунних болтів та зубів шестерень. Окрім цього, до тріщин здатні призводити своїм впливом значні місцеві навантаження, удари і перенапруження [4, 5]. Такі явища можуть виникати у найбільш навантажених ділянках таких елементів: рами, балки мостових кранів, блоки, корпуси коробок передач, задні мости та інші корпусні деталі [6].

Одним із заходів для запобігання виникненню несправностей втомного характеру є обробка поверхонь такими способами: обкатка робочих поверхонь деталей шариками та роликами, зниження шорсткості поверхні, формування правильних радіусів переходу від однієї поверхні до іншої.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Складність конструктивних

форм вузлів і деталей сучасних машин, різноманіття діючих на них навантажень у більшості випадків не дозволяють визначати напружений стан розрахунковим шляхом або моделюванням при створенні машин нових конструкцій [7, 8].

Аналіз попередніх досліджень показав, що для експериментального дослідження локальної області установки в процесі експлуатації найбільш оптимальним методом є тензометрія [9–11].

Тензометрування машин, механізмів, агрегатів і технологічного обладнання необхідно для оцінки напружено-деформованого стану елементів, деталей і вузлів при експлуатаційних або спеціальних режимах роботи [12].

Тензометрія як метод заснована на здатності вимірювання та аналізу деформацій, що у свою чергу дає можливість оцінки напруженого стану [13, 14].

Тензорезистори являють собою резистори, електричний опір яких змінюється пропорційно зі зміною їх лінійних розмірів під дією механічного напруження на поверхні об'єкта дослідження. [15]. Робота тензорезисторів заснована на явищі тензоефекту, зміні опору провідників при їх механічній деформації.

Це дає підстави стверджувати, що проведення тарировки тензорезисторів у комплексі з вимірювально-реєструвальним обладнанням є доцільною.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження полягає в обґрунтуванні проведення тарировки тензорезисторів у комплексі з вимірювальним обладнанням.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– провести тарировку тензорезисторів у комплексі з вимірювально-реєструвальним обладнанням;

– побудувати функціональну залежність між навантаженням, що діє на випробовувану деталь, і вихідним сигналом вимірювально-реєструвального обладнання.

Основна частина дослідження.

Геометричні розміри тензорезисторів змінюються при їх деформації. Основну роль в утворенні електричного сигналу в напівпровідникових тензорезисторах відіграє зміна їх питомого опору під дією механічного навантаження.

Чутливість як механічних, так і напівпровідникових тензорезисторів оцінюється коефіцієнтом тензочутливості k , визначеним тензоефектом

$$k = 1 + 2\mu + \nu = (\Delta R/R) / (\Delta l/l),$$

де μ – коефіцієнт Пуассона;

ν – коефіцієнт зміни питомого опору провідника;

ΔR – приріст опору провідника;

R – опір провідника;

Δl – приріст (зменшення або збільшення) геометричних параметрів провідника;

l – довжина провідника.

Дротовий тензорезистор являє собою конструкцію, де чутливий елемент виготовлений з дроту діаметром 0,02–0,05 мм, нанесеного на підкладку (основу) лакової плівки або тонкого паперу.

Як матеріал для дроту константан використовується найчастіше, це характеризується великим коефіцієнтом тензочутливості k і малим температурним коефіцієнтом опору (Cu-Ni-Mn).

Тензорезистори, які були відібрані для проведення тарировки, були перевірені. Також був вимірний опір тензорезисторів та проведено їх групування за мінімальним розкидом. Але найбільш відповідальною операцією є підготовка поверхні деталі, на яку наклеюються тензорезистори, та

забезпечення чистоти поверхонь, які склеюються.

Також було проведено розмітку схеми наклеювання тензорезисторів (тензорезистори були розміщені на випробовуваній деталі так, щоб під час деформації деталі решітка тензорезистора розтягувалася або стискалася). Підготовлена для наклеювання деталей була нагріта до рекомендованої температури 50–70 °С та проведений контроль якості наклеювання тензорезисторів. Також здійснено гідроізоляцію тензорезисторів для захисту від дії вологи, теплоти та механічних пошкоджень.

Після вищевказаних заходів необхідно провести тарировку тензорезисторів у комплексі з вимірювальною апаратурою.

Тарировка полягає у віднайденні функціональної залежності між навантаженням, що діє на випробовувану деталь, і вихідним сигналом апаратури. Для цього, створюючи заздалегідь відомі навантаження на деталь, на якій наклеєні тензорезистори, і порівнюючи значення цих навантажень з інтенсивністю вихідного сигналу, визначають аналітично або графічно їх співвідношення.

Залежно від розмірів, конфігурації та інших особливостей досліджуваної деталі використовують два способи тарировки тензорезисторів: безпосередній і непрямий.

Для отримання достовірних результатів вимірювань умови тарировки повинні якнайменше відрізнятися від умов проведення експериментальних досліджень об'єктів. Це означає, що схема навантаження деталі, склад вимірювальної системи, умови її експлуатації як при тарировці, так і при випробуваннях мають бути однаковими.

Тому для визначення отриманих результатів напружень, деформацій у досліджуваній деталі (балці мостового крана) була проведена безпосередня (статична тарировка).

В електротензометрії використовують дві схеми вимірювання: мостову і напівмостову. Мостова схема частіше застосовується при статичних процесах. У такій схемі один тензорезистор є активним, а інший розташовується в зоні дії навантаження і використовується як температурний компенсатор.

У випадку, коли на досліджувану деталь діють різні види навантажень, які викликають деформації згину, кручення, зсуву, стиску або розтягнення, тензорезистори розташовуються в схемі таким чином, щоб вони були здатні сприймати різні види деформації. Для цього було використано напівмостову схему підключення.

У схемі використовуються два активних тензорезистори з ортогональним і опозитним розташуванням, з термокомпенсацією. Тензорезистори фіксуються таким чином, щоб вісь симетрії дротової решітки збігалася за напрямком з віссю дії деформації, яка вимірюється.

Деформація вигину виключена підключенням у протилежних напрямках. У досліджуваній деталі (балка мостового крана) при навантаженні переважає дефор-

мація розтягування. Під навантаженням балка прогинається і тим самим збільшується її довжина, а ширина, навпаки, зменшується.

Зовнішні дроти тензорезисторів за допомогою клемних колодок з'єднувались з дротами напівмостової схеми, яка була підключена до аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) ZetLab 210 (рис. 1).

Тарировка полягала в підйомі і поступовому нарощуванні маси вантажу з 0,0 до 3500 кг, при кроці нарощування вантажу у 500 кг.

Вагу вантажу вимірювали за допомогою динамометра ДПУ-10-2. Динамометр ДПУ-10-2 застосовується для вимірювання статичних розтягувальних зусиль, відградуєваних у кілоньютонах. Динамометр здатен працювати в діапазоні температур довкілля від -10 до +45 °С і при відносній вологості не більше 60 %. Габаритні розміри – 780 x 280 x 200 мм.

Межі вимірювань динамометра ДП-10-2:

– мінімальна – 10 кН (1000 кгс);

– максимальна – 100,0 кН (10000 кгс,

10

тс).

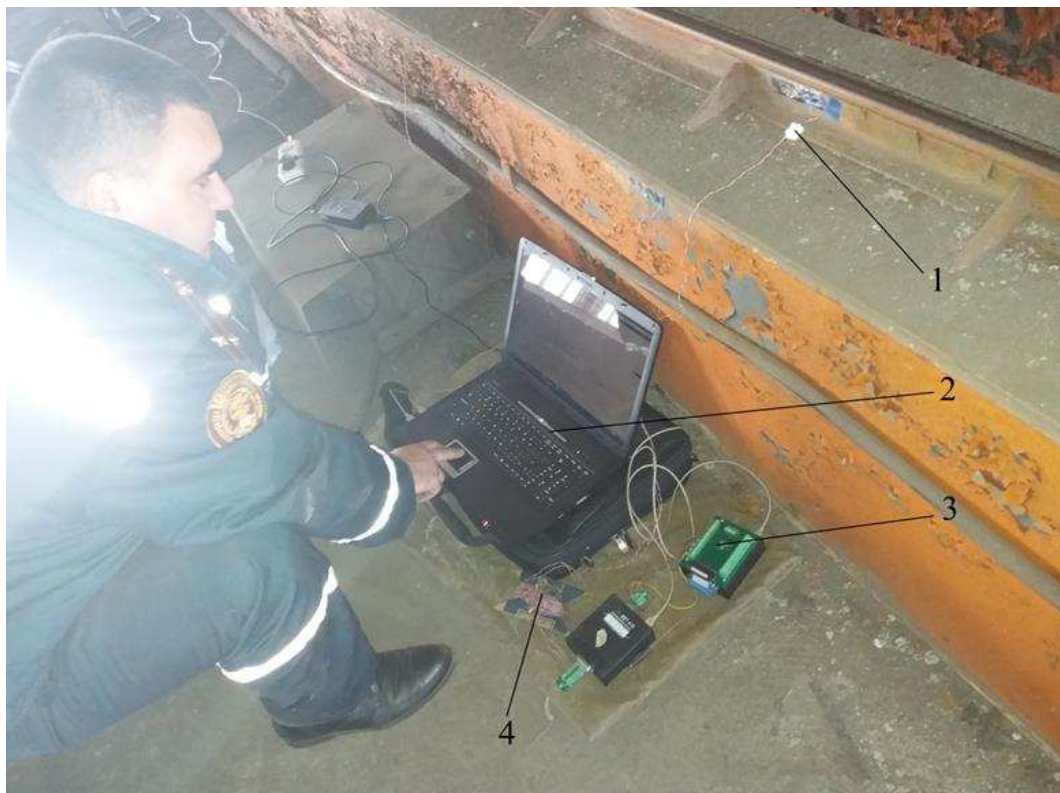


Рис. 1. Загальний вигляд вимірювального обладнання:

1 – клемна колодка; 2 – електронно-обчислювальна машина (ЕОМ);

3 – АЦП; 4 – напівмостова схема підключення

Ціна поділки – 1,0 кН (100 кгс). Межі основної зведеної похибки $\pm 2\%$, при знятті навантаження з динамометра стрілка відлікового пристрою встановлюється на нульову позначку таким чином, щоб похибка склала не більше 0,5 ціни поділки шкали.

Межі додаткової похибки динамометра 10 т (100 кН), обумовлені зміною температури довкілля в робочому діапазоні температур, відмінних від температури нормальних умов, 0,25 основної похибки на кожні 10 °С.

Межа допустимого значення варіації показань динамометра не перевищує абсолютного значення межі допустимого значення основної похибки. Поріг реагування – не більше 0,5 % найбільшої межі вимірювання [16].

Допустиме перевантаження – 100 % від найбільшої границі вимірювань. Маса динамометра ДПУ-10-2 – 20 кг.

При підйомі вантажу затримка під час кожного циклу (рис. 2) становила 60 с, при опусканні вантажу – 180 с.

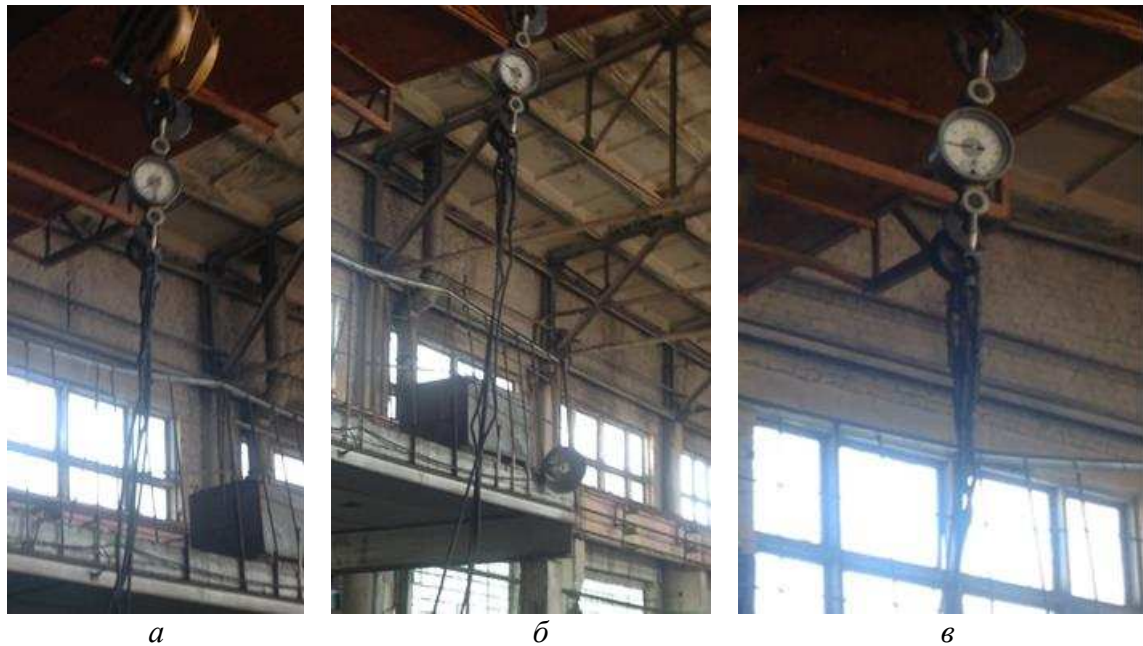


Рис. 2. Фіксація вантажу під час тарировки:
 а – вага вантажу 1000 кг; б – вага вантажу 2000 кг; в – вага вантажу 3000 кг

Для проведення подальших розрахунків використовували такі вихідні дані:

- довжина робочої поверхні (прогін крана) – $l_p = 22500$ мм;
- матеріал виготовлення моста крана – ВМстЗпс;
- товщина стінки балки – $\delta = 6$ мм;
- тривалість підйому вантажу – 180 с, $t_n = 60$ с;
- тривалість опускання вантажу – 60 с, $t_o = 180$ с;
- довжина тензорезистора – $l_\delta = 30$ мм;
- живлення тензометричного моста – $E_v = 1,5$ В;
- коефіцієнт тензочутливості – $k_\delta = 2$;

- коефіцієнт Пуассона – $\nu = 0,3$;
- напруження в досліджуваній деталі (балка мостового крана), отримані експериментальним шляхом – e_0 мВ;
- модуль Юнга – $E = 2,05 \cdot 10^5$ Н/мм².

За підсумками експериментальних досліджень були отримані напруження в досліджуваній деталі (балка мостового крана), рис. 3.

Використовуючи програму розрахунків Mathcad15, визначимо інші деформації і напруження (рис. 4–5).

Тарировку тензорезисторів у комплексі з вимірювально-реєструвальним обладнанням проведено в повному обсязі.

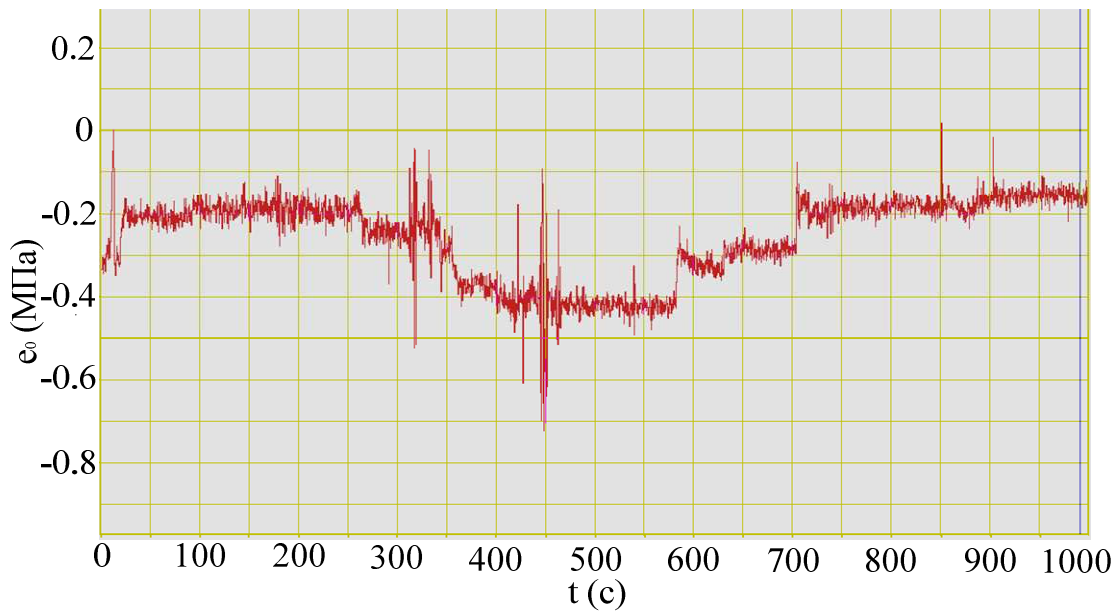


Рис. 3. Напруження в мосту крана, отримані експериментальним шляхом з використанням АЦП ZetLab 210

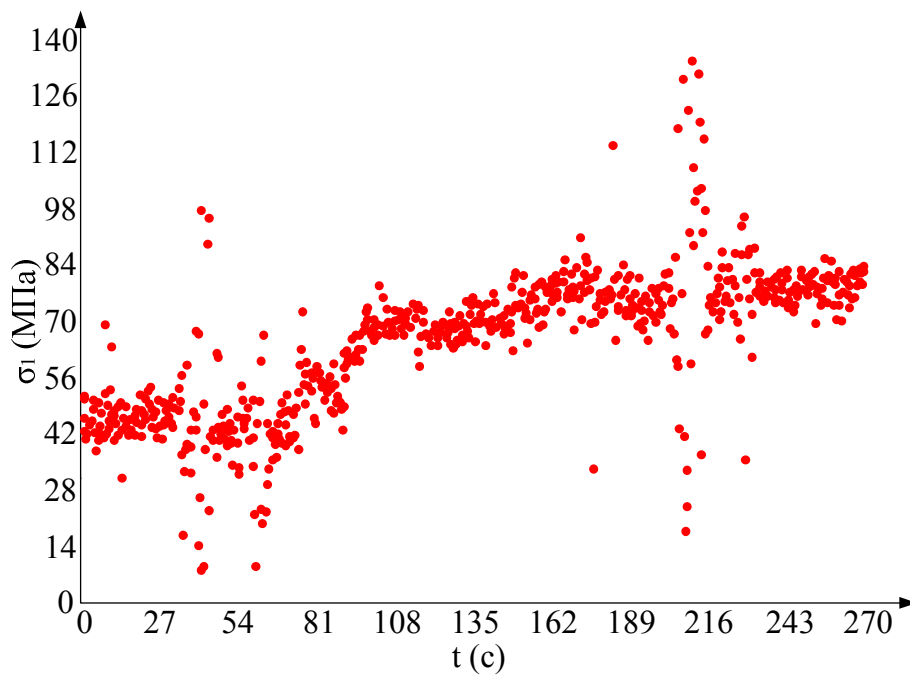


Рис. 4. Графік напружень в мосту крана під час підйому вантажу від 0,0 до 3,5 т

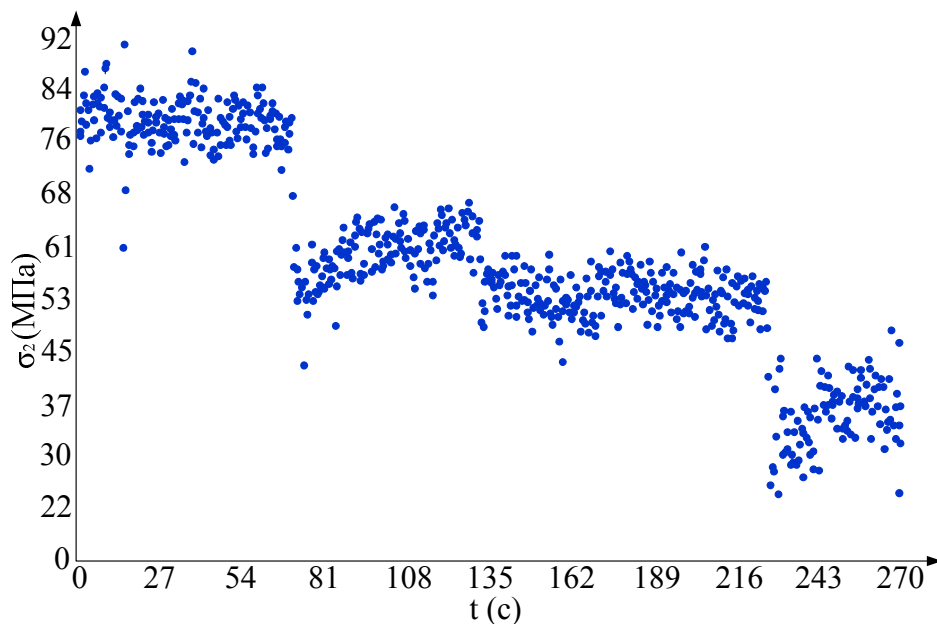


Рис. 5. Графік напружень в мосту крана під час опускання вантажу від 3,5 до 0,0 т

З урахуванням середніх значень при підйомі і опусканні вантажу в досліджуваній деталі (мосту крана) виникали

механічні напруження, відображені в таблиці.

Таблиця

Механічні напруження в досліджуваній деталі (мосту крана) під час підйому та опускання вантажу

Маса вантажу, тонн	Напруження під час підйому вантажу, МПа	Напруження під час опускання вантажу, МПа
0	28	28
0,5	35	37
1	46	42
1,5	56	52
2	60	58
2,5	66	67
3	77	72
3,5	92	90

За результатами усереднених значень напружень під час підйому і опускання вантажу побудуємо тарувальну криву (рис. 6).

За графіком тарировки тензорезисторів бачимо, що вимірювально-реєструвальне обладнання та програмне забезпечення дає змогу в реальному часі будувати функціональні залежності між

навантаженням, що діє на випробовувану деталь, і вихідним сигналом вимірювально-

реєструвального

обладнання.

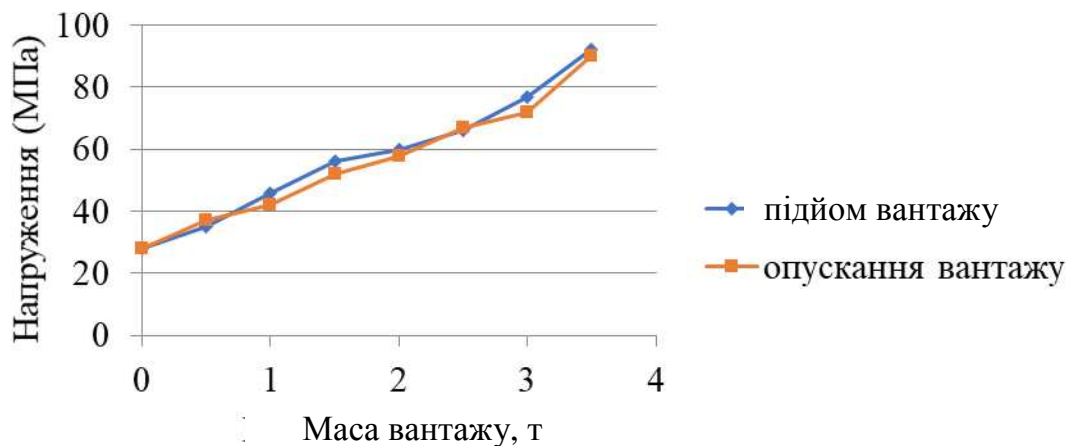


Рис. 6. Тарувальна крива

За допомогою графіка тарировки, під час подальших експериментальних досліджень, отримані дані напруженого стану в деталі з електричних сигналів напружень мілівольтів (мВ) можна перерахувати в механічні мегапаскалі (МПа).

Висновки. Тарировка тензорезисторів у комплексі з вимірювально-реєструвальним обладнанням виконана в повному обсязі.

Вибране вимірювально-реєструвальне обладнання, програмне забезпечення, що входить до складу вимірювального комплексу, дає змогу в реальному часі будувати функціональні залежності між навантаженням, що діє на випробовувану деталь, і вихідним сигналом вимірювально-реєструвального обладнання.

Список використаних джерел

1. Nischeta S. A., Chernyshova E. P., Narkevich M. Y., Krishan A. L., Sagadatov A. I. Damage of bridge lifting cranes and crane metal structures. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. №12 (23). P. 6587–65890. URL: [https:// www.researchgate.net/publication/325416488](https://www.researchgate.net/publication/325416488).
2. Antsev V. Y., Tolokonnikov A. S., Vorobev A. V., Sakalo V. I. Methods of determining the margin of cyclic crack resistance of metal structures for hoisting machinery. *Materials Science and Engineering*. 2017. №177. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012096>.
3. Marazania T., Madyiraa D., Akinlabi E. Repair of cracks in metals: A review. *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 8. P. 673–679. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.086>.
4. Yifei T., Zhihao G., Xingcheng Z., Guomin S., Dongbo L., Xiangdong L. Research on welding deformation for box girder of bridge crane based on thermal elasto-plastic theory. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10 (5). P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1177/1687814018775885>.
5. Spruogis B., Jakstas A., Turla V., Iljin I., Sesok N. Dynamic reaction forces of an overhead crane on lifting. *TRANSPORT*. 2011. Vol. 26 (3). P. 279–283. URL: <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.622144>.

6. Kishor K., Namesh K. Study on control of cracks in a Structure through Visual Identification & Inspection. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2014. Vol. 11 (5). P. 64–72. URL: <https://doi.org/10.9790/1684-11566472>.
7. Фідровська Н. М., Слепужніков Є. Д. Визначення оптимальних параметрів ходових коліс мостових кранів. *Науковий вісник будівництва*. 2012. Вип. 69. С. 215–222. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7436>.
8. Фідровська Н. М., Слепужніков Є. Д., Чернишенко О. В. Міцність трьохшарової циліндричної оболонки. *Науковий вісник будівництва*. 2015. Вип. 1 (79). С. 190–193. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7456>.
9. Ступницький В. В., Доляняк Я. В. Дослідження залишкових напружень та деформацій методом ультразвукової акустичної тензометрії. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні: зб. наук. праць. 2015. № 822. С. 58–66.
10. Fidrovska N., Slepuzhnikov E., Varchenko I. Preparation of tensoresistors and measuring equipment for experimental research. *Norwegian Journal of development of the International Science. Technical Sciences*. 2020. № 45. Vol. 1. P. 69–72. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11233>.
11. Слепужніков Є., Варченко І., Фідровська Н. Проведення експериментальних досліджень методом тензометрії: матеріали конференцій МЦНД. 2020. С. 85–86. URL: <https://doi.org/10.36074/01.05.2020.v2.10>.
12. Pastor M., Trebuna F., Lengvarsky P., Bocko J. Possibility of using of tensometry in deformation analysis in areas with sudden change of geometry. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2016. №4 (7). P. 36–367. URL: <https://www.researchgate.net/publication/313108265>.
13. Tutak P. Application of strain gauges in measurements of strain distribution in complex objects. *JACSM*. 2014. №6 (2). P. 135–145. URL: <https://doi.org/10.1515/jacsm-2015-0004>.
14. Ghimbaseanu I. Experimental research study on the use of a resistive tensometric. *International Scientific Journal: Machines. Technologies. Materials*. 2015. №9 (1). P. 44–47. URL: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2015/1/44>.
15. Pastor M., Carak P., Gomory I. The assessment of the residual stresses influence on generation of the infringement in shape-complex supporting members. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019. №69 (1). P. 85–96. URL: <https://doi.org/10.2478/scjme-2019-0007>.
16. Динамометр ДПУ-10-2. URL: <http://standart-m.com.ua/> URL: <http://standart-m.com.ua/izmeritelnye-pribory/dinamometry/dinamometry-dpu/dinamometry-dpu-10-2?mova=uk> (дата обращения: 01.12.2020).

Фідровська Наталія Миколаївна, доктор техн. наук, професор кафедри будівельних і дорожніх машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. ORCID iD: 0000-0002-5248-273X. Тел.: +38(097) 396-98-83. E-mail: nfidrovskaya@ukr.net.

Пономаренко Роман Володимирович, доктор техн. наук, с.н.с., заступник начальника кафедри пожежної та рятувальної підготовки Національного університету цивільного захисту України. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6300-3108>. Тел.: +38(066)-029-71-21. E-mail: prv@nuczu.edu.ua.

Слепужніков Євген Дмитрович, кандидат техн. наук, викладач кафедри спеціальної хімії та хімічної технології Національного університету цивільного захисту України. ORCID iD: 0000-0002-5449-3512. Тел.: +38(067)922-99-14. E-mail: ors2011@ukr.net.

Козодой Дмитро Сергійович, кандидат техн. наук, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3615-1815. Тел.: +38(066)519-47-31. E-mail: Dmitry_1980@ukr.net.

Fidrovska Nataliia, Dr. Sc. (Tech.), professor of the department of construction and road machines, Kharkiv national automobile and road university. ORCID iD: 0000-0002-5248-273X. E-mail: nfidrovskaya@ukr.net.

Ponomarenko Roman, Dr. Sc. (Tech.), Deputy Head of the Department of fire and rescue training National university of civil defence of Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6300-3108>. Email: prv@nuczu.edu.ua.

Slepuzhnikov Evgen, PhD (Tech.), lecturer at the department of special chemistry and chemical technology of the National university of civil defense of Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-5449-3512. E-mail: ors2011@ukr.net.

Kozodoi Dmytro, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of labor protection and environment, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3615-1815. E-mail: Dmitry_1980@ukr.net.

Статтю прийнято 24.11.2020 р.