

УДК 624.014:620.111.3

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.6.81928

Г.С. Тимчик, М.В. Філіппова, М.О. Демченко

НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ОДНОВІСНИХ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ У НАВАНТАЖЕНИХ ФАСОННИХ ПРОФІЛЯХ

Background. The article is devoted to the problem of determining the actual values of mechanical stress of metal structure sections in the process of operation without discharge using acoustic method.

Objective. Experimentation with the actual mechanical stress in the shelves shaped profiles of metal constructions that are in operation.

Methods. The method of acoustic diagnostics of stress-strain state of sections of metal constructions, based on the differential method of determining mechanical stress for the achievement of the aim of the research was proposed.

Results. Existing mechanical stresses in the shaped profiles of metal constructions for industrial installations in operation are studied. A comparative analysis of the values of the actual mechanical stresses in the shaped profiles calculated for the selected control points is carried out, resulting in a set deviation of the measured values from the calculated stresses in the range of 2.5–3.5 %.

Conclusions. The result of the experimental research and conducted analysis of the values of uniaxial mechanical stress measured using the system of diagnostics of stress-strain state of sections of metal constructions and voltages for the same points of the computational methods for profiles camber, allowed us to draw conclusions about the technical condition of metal constructions of industrial buildings in the construction phase.

Keywords: shaped profiles; actual stresses; metal constructions.

Вступ

Надійна експлуатація металевих конструкцій (МК) промислових споруд потребує проведення постійного моніторингу їх технічного стану, основним інформативним показником якого є результати порівняння проектних і фактичних значень механічних напружень в умовах експлуатаційних навантажень. Критичні значення фактичних механічних напружень виникають у локальних зонах елементів МК унаслідок порушення умов експлуатації, зазначених у технічній документації.

Серед усіх конструктивних елементів промислових споруд найбільше навантаження мають перекриття із просвітом між опорними елементами, виконані зі сталевих фасонних профілів (ФП). Ці елементи працюють на вигин, де в місцях найбільшого прогину виникають максимальні значення механічних напружень. Зміна напружено-деформованого стану МК споруди може бути спричинена низкою чинників, таких як: зміна призначення будівлі; реорганізація технологічного процесу зі зміною обладнання технологічних ліній у самій будівлі; експлуатація споруди за межами проектних режимів; природні катаклізми; потоншення під дією корозії елементів конструкцій; зміна нормативних вимог, що ставляться до будівництва.

Особливе значення для контролю технічного стану промислових споруд має розробка оперативних методів неруйнівного контролю, які дають змогу обчислювати значення дійсних механічних напружень ФП з високою точністю протягом усього життєвого циклу будівлі без пошкодження цілісності конструкції [1, 2].

Для визначення дійсних значень напружень МК в умовах експлуатації застосовують акустичні методи, в основі яких лежить акустопружний ефект [3, 4], тобто встановлення функціональної залежності між затримкою поширення акустичної хвилі та тензорами напружень [5]. Це викликано тим, що механічні напруження призводять до зміни швидкості поширення звуку в середовищі.

Ефективність методів акустичної тензометрії неодноразово підтверджена багатьма авторами за результатами експериментальних досліджень напружено-деформованого стану (НДС): у тонкостінних МК [5–8], що працюють під тиском (баків, труб, цистерн); у металевих прутках [9]; в елементах залізничного транспорту (колесах, рейках) [10–12]; у пружних елементах прецизійних приладів [13–15].

У роботах [16, 17] реалізовано акустичний метод визначення дійсних механічних напружень у полицях ФП, зокрема з урахуванням швидкості поширення поперечної хвилі на ділянках ФП, що мають різні значення механіч-

них напружень. Це дає змогу проводити вимірювання дійсних напружень без використання зразків металу з нульовими напруженнями.

Постановка задачі

У роботі поставлена задача проведення експериментальних досліджень дійсних механічних напружень у полицях ФП МК промислових споруд із використанням розробленого акустичного методу діагностики НДС ФП.

Акустичний метод визначення дійсних механічних напружень фасонних профілів

Під дією навантаження при вигині балки відбувається деформація її кристалічної структури та виникають механічні напруження. Завдяки чистому вигину в полицях профілю є лише плоскі напруження вздовж осі x , які надалі будемо називати одновісними. Плоский напружений стан запишемо у векторному вигляді системи рівнянь [18]:

$$\sigma_x = \int_{x_1}^{x_2} \sigma_{xx}(x) dx \neq 0,$$

$$\sigma_y = \int_{y_1}^{y_2} \sigma_{yy}(y) dy = 0,$$

$$\sigma_z = \int_{z_1}^{z_2} \sigma_{zz}(z) dz = 0.$$

Характерними напруженнями для ФП є одновісні напруження, спрямовані уздовж профілю паралельно його нейтральній лінії. Напруження в перетині ФП розподіляються таким чином, що максимуми досягаються на полицях профілю, а на нейтральній лінії напруження відсутні.

Для визначення механічних напружень в елементах двоопорних балок, що виконані з ФП, використовують зону, в якій досягаються максимальні навантаження (зовнішня поверхня полиці):

$$\sigma_x = \frac{M_x}{J_x} \frac{h}{2},$$

де M_x – момент сили; J_x – момент інерції; h – висота профілю.

Одновісні напруження за даними акустичних вимірювань, що проводяться для матеріалу з малим значення анізотропії, визначаються як [17]

$$\sigma_x = \frac{1}{k_k} \left(\frac{t}{s} \frac{\tau_1}{\tau_2} - 1 \right) f(x),$$

де k_k – акустопружний коефіцієнт, t – товщина полиці ФП у місці прозвучування, s – товщина стінки ФП у місці прозвучування, τ_1 – час проходження поперечної хвилі в стінці на нейтральній лінії, τ_2 – час проходження поперечної хвилі в полиці.

У випадку розподілення напруження по ФП за лінійним законом необхідним є введення інтегрального геометричного коефіцієнта $f(x)$:

$$f(x) = \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{h} \right) \left(1 - \frac{d}{l} \right),$$

де d – половина відстані між перетворювачами, l – половина довжини ФП.

Для параболічного розподілення напружень у ФП інтегральний геометричний коефіцієнт буде мати вигляд

$$f(x) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d^2}{l^2} \right) \left(3 - \frac{t}{h} \right) - 1.$$

Інтегральний геометричний коефіцієнт не вводиться, коли усереднене значення напруження за шляхом прозвучування близьке до напруження в точці введення ультразвукової хвилі, тобто

$$f(x) = 0.$$

Для НДС сталь 3 С245 за ГОСТ 27772–88 розтягнення акустопружний коефіцієнт зв'язку становить $k_k = -(14,82 \pm 0,08) \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}$, а для стиснення $k_k = -(0,23 \pm 0,05) \text{ МПа}^{-1}$. Цей матеріал є основним для виготовлення ФП МК, виробляється в Україні та масово використовується в промисловому і цивільному будівництві.

Результати дослідження

В умовах зростання темпів будівництва необхідно проводити діагностику впродовж усього життєвого циклу споруди для передбачення та запобігання аварійним ситуаціям. Одним із основних етапів життєвого циклу споруди є її зведення. Тому так само, як і під час експлуатації, потрібно проводити діагностику тримальних елементів МК споруди на етапі її будівництва.

У ході виконання роботи була проведена діагностика НДС ФП МК адміністративно-господарчої будівлі (м. Чернігів) (рис. 1) у період її будівництва з метою попередження та запобігання появі зон концентрації напружень. Вимірювання проводилася з використанням розробленої системи діагностики НДС ФП МК за розробленою загальною методикою акустичної діагностики НДС ФП МК промислових споруд. Діагностика проводилася безпосередньо під наглядом генеральної підрядної організації, що виконувала монтажні роботи. Для запобігання виникненню грубих похибок від вібрацій та ударів діагностика проводилася у вечірній та ранковий час, коли роботи припинялися. Це дало змогу забезпечити безпеку виконання діагностичних робіт в умовах будівництва.

Як об'єкт контролю разом із генпідрядною організацією вибрані ФП, що найбільше піддаються дії навантаження: балки Б1, Б2 та Б3 – підстелені балки перекриття. Для діагностики вибрано по 3 ФП із кожного типу балки. На рис. 1 стрілками показано балки Б1 та Б2, що розміщені в основній частині будівлі, балки Б3 на рисунку не показані (містяться по ліву сторону за перестінком).

Балки Б1 та Б2 виконані з прокатного ФП типу двотавр № 45М з довжиною прогону 12000 мм. Висота від нульового рівня підлоги до верхньої полиці профілю балки Б1 становить 8350 мм. Балки Б2 розміщені на висотах 7150–8350 мм. Балки Б3 виконані з прокатного ФП типу швелер № 20П з довжиною прогону 6000 мм і розміщені на висотах 3450–4650 мм.



Рис. 1. Фото спорудження адміністративно-господарчої будівлі в м. Чернігів: Б1, Б2 – елементи МК, Б3 не показані

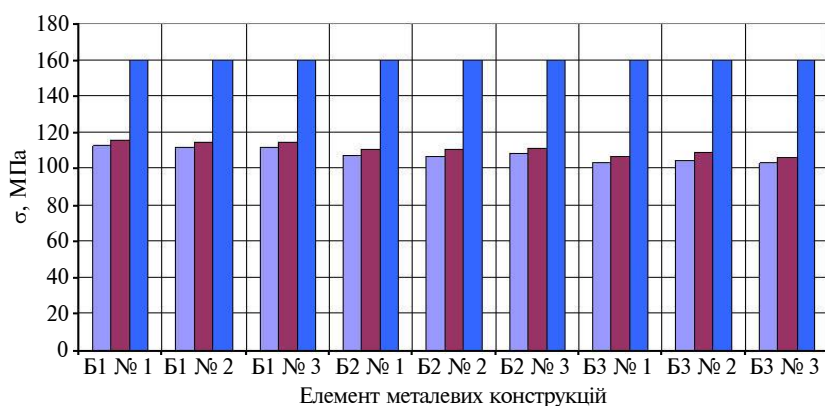


Рис. 2. Результати діагностики НДС ФП МК адміністративно-господарчої будівлі: ■ – розрахункове, ■ – виміряне, ■ – допустиме напруження

Результати проведення акустичної діагностики НДС описаних вище ФП балок показані на рис. 2, тобто наведено порівняння вимірених значень напружень за розробленою методикою акустичної діагностики НДС ФП і за допомогою візуально-оптичного та вимірювального методів контролю в рамках запропонованої методики комплексного аналізу НДС ФП МК промислових споруд.

Розраховані напруження за даними візуально-оптичного та вимірювального контролів, що проводяться за визначеними стандартами, вважаються дійсними та використовуються для оцінки технічного стану будівель на державному рівні. Тому в цій роботі проведено порівняння значень НДС, отриманих у результаті використання запропонованої методики акустичної діагностики НДС ФП, із вказаними вище розрахунковими значеннями напружень.

Аналіз отриманих даних (див. рис. 2) показав відхилення вимірених значень напружень від розрахункових у межах 2,5–3,5%, найбільша розбіжність між розрахунковим та виміреним значеннями отримана для балок Б3. Це пояснюється тим, що балка Б3, порівняно з балками Б1 і

Б2, має менші довжину прогону і номер профілю та більш концентровану діаграму розподілення напружень повздовж прогону. Тому для балок Б3 значення усереднених по базі прозвучування напружень більше різняться з розрахунковими значеннями, ніж для балок Б1 та Б2 з більшою довжиною прогону.

Аналіз значень одновісних напружень, що виміряні з використанням системи діагностики НДС ФП МК промислової споруди та напружень, отриманих для тих самих точок розрахунковими методами за прогинами профілів, дають змогу зробити такі висновки.

1. Результати вимірювання часових інтервалів показали незначне відхилення їх значень від допустимих меж. Причиною цього була наявність сильного бокового вітряного потоку, що спричинило виникнення вібрацій та збільшення навантаження на конструкцію.

2. Встановлено значення напружень, що показують недозавантаженість конструкції. Для розрахункового максимального допустимого значення навантаження в 160 МПа дійсне значення навантаження становило 110 МПа. Інтерпретувати результати можна таким чином: оскільки будівництво споруди не завершено, то

на елементи конструкції споруди діє тільки частина з розрахункових значень навантаження. Тому результати показали такі низькі значення напружень від допустимих.

Висновки

Метод акустопружності, реалізований для діагностики НДС ФП МК, доцільно використовувати для визначення дійсних механічних напружень у ФП МК промислових споруд з метою встановлення їх технічного стану під час експлуатації. Метод може використовуватись для обчислення дійсних значень механічних напружень як перевірка розрахункових методів при експлуатації та зведенні споруди. Це дасть змогу використовувати такий метод у промислових умовах як неруйнівний контроль разом з іншими методами для діагностики НДС МК.

Напрямом подальших досліджень є розробка методики проведення акустичної діагностики НДС ФП МК із використанням акустичного методу визначення дійсних значень механічних напружень.

Список літератури

1. *Алешин Н.П.* Возможности методов неразрушающего контроля при оценке напряженно-деформированного состояния нагруженных металлоконструкций // Сварка и диагностика. – 2011. – № 6. – С. 44–47.
2. *Диагностика* материалов конструкций на ранних стадиях усталостного разрушения и оценка НДС материала конструкций методами неразрушающего контроля / В.В. Мишакин, Н.В. Данилова, К.В. Курашкин и др. // Вестник СГАУ. – 2011. – № 3 (27), ч. 1. – С. 299–307.
3. *Internal stress monitoring of in-service structural steel members with ultrasonic method* / Z. Li, J. He, J. Teng, Y. Wang // Material. – 2016. – 9, № 4. – P. 1–17.
4. *Guz A.N.* Ultrasonic nondestructive methods of stress analysis in materials and structural members (review) // Int. Appl. Mech. – 2011. – 46, № 11. – P. 3–11.
5. *Никитина Н.Е., Казачек С.В.* Преимущества метода акустопружности для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник науч.-техн. развития. – 2010. – № 4 (32). – С. 18–28.
6. *Bray D.E., Tang W.* Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the L_{CR} ultrasonic wave // Nucl. Eng. Design. – 2001. – 207, № 2. – P. 231–240.
7. *Guz A.N., Makhort F.G.* The physical fundamentals of the ultrasonic nondestructive stress analysis of solids // Int. Appl. Mech. – 2000. – 36, № 9. – P. 1119–1149.
8. *Kaleli T., Gür C.H.* Non-destructive determination of residual stresses in the spiral submerged arc welded steel pipes // 19th World Conf. Non-Destructive Testing. – 2016. – P. 1–6.
9. *Chaki S., Bourse G.* Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands // Ultrasonics. – 2009. – 49, № 2. – P. 162–171.
10. *Лазерно-ультразвуковой метод выявления продольных напряжений рельсовых плетей* / А.А. Карабутов, А.Н. Жарин, А.Ю. Ивочкин и др. // Мир измерений. – 2012. – 9. – С. 10–17.
11. *Бобренко В.М., Куценко А.Н. Рудаков А.С.* Акустическая тензометрия // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 4. – С. 23–39.
12. *Курашкин К.В., Мишакин В.В.* Использование ультразвуковых волн для оценки механических напряжений в материале сварных соединений // Сб. трудов XXII сессии РАО. Т. 2. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 106–110.
13. *Відчутники* контрольно-вимірювальних систем / Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, Т.Р. Ключко та ін. – К.: НТУУ “КПІ”, 2008. – 239 с.

14. Безвесільна О.М., Подчаїнський Ю.О., Тимчик Г.С. Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин. Інформаційно-комп'ютерні системи та технології. – Житомир: ЖДТУ, 2011. – 876 с.
15. Богдан Г.А., Протасов А.Г. Применение дискретного ортогонального метода измерения фазы для определения характеристик материалов ультразвуковым методом // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2016. – № 2. – С. 87–93.
16. Tymchik G., Filippova M., Demchenko M. Analysis of acoustic diagnostics errors of stress state for shaped profiles of metal structures // Eureka: Physics and Engineering. – 2016. – № 5. – P. 50–57.
17. Тимчик Г.С., Філіппова М.В., Демченко М.О. Застосування акустичного методу для діагностики напруженого стану фасонних профілів // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2016. – № 5. – С. 99–105.
18. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Є.С. Опір матеріалів. – К.: Вища школа, 2004. – 655 с.

References

1. N.P. Aleshin, “Features of non-destructive testing methods in the evaluation of the stress-strain state of loaded metal structures”, *Svarka i Diagnostika*, no. 6, pp. 44–47, 2011 (in Russian).
2. V.V. Mishakin *et al.*, “Diagnostics of constructions’ materials in the early stages of fatigue failure and estimation of the stress-strain condition of constructions’ material by methods of non-destructive testing”, *Vestnik SGAU*, no. 3 (27), part 1, pp. 299–307, 2011 (in Russian).
3. Z. Li *et al.*, “Internal stress monitoring of in-service structural steel members with ultrasonic method”, *Material*, vol. 9, no. 4, pp. 1–17, 2016. doi: 10.3390/ma9040223
4. A.N. Guz, “Ultrasonic nondestructive methods of stress analysis in materials and structural members (review)”, *Int. Appl. Mech.*, vol. 46, no. 11, pp. 3–11, 2011. doi: 10.1007/s10778-011-0413-x
5. N.E. Nykytyna and S.V. Kazachek, “Benefits of acoustoelasticity method for the nondestructive testing of mechanical stresses in machine parts”, *Vestnyk Nauchno-Tekhnicheskoho Razvytyia*, no. 4 (32), pp. 18–28, 2010 (in Russian).
6. D.E. Bray and W. Tang, “Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the L_{CR} ultrasonic wave”, *Nucl. Eng. Design*, no. 2 (207), pp. 231–240, 2001. doi: 10.1016/s0029-5493(01)0034-x
7. A.N. Guz and F.G. Makhort, “The physical fundamentals of the ultrasonic nondestructive stress analysis of solids”, *Int. Appl. Mech.*, vol. 36, no. 9, pp. 1119–1149, 2000. doi: 10.1023/A:1009442132064
8. T. Kaleli and C.H. Gür, “Non-destructive determination of residual stresses in the spiral submerged arc welded steel pipes”, in *Proc. 19th World Conf. Non-Destructive Testing*, 2016, pp. 1–6.
9. S. Chaki and G. Bourse, “Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands”, *Ultrasonics*, vol. 49, no. 2, pp. 162–171, 2009. doi: 10.1016/j.ultras.2008.07.009
10. A.A. Karabutov *et al.*, “Laser-ultrasonic method for detecting longitudinal stresses rail lashes”, *Myr Yzmerenyi*, no. 9, pp. 10–17, 2012 (in Russian).
11. V.M. Bobrenko *et al.*, “Acoustic tensometry”, *Kontrol. Dyahnostyka*, no. 4, pp. 23–39, 2001 (in Russian).
12. K.V. Kurashkyn and V.V. Myshakyn, “Laser-ultrasonic method for detecting longitudinal stresses rail lashes”, in *Proc. XXII Session of Russian Acoustical Society*, no. 2, pp. 106–110, 2010 (in Russian).
13. G. Tymchik *et al.*, *Measurement and Control System Feelers*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2008 (in Ukrainian).
14. O.M. Bezvesilna *et al.*, *Research in the field of Measuring Mechanical Quantities. Information Technology and Computer Systems*. Zhytomyr, Ukraine: Zhytomyr State Technological University, 2011 (in Ukrainian).
15. G.A. Bogdan and A.G. Protasov, “Application of the digital orthogonal method of phase measurement for characteristics materials definition by ultrasonic method”, *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 2, pp. 87–93, 2016 (in Russian). doi: 10.20535/1810-0546.2016.2.66026
16. G. Tymchik *et al.*, “Analysis of acoustic diagnostics errors of stress state for shaped profiles of metal structures”, *Eureka: Physics and Engineering*, no. 5, pp. 50–57, 2016. doi: 10.21303/2461-4262.2016.00153
17. G. Tymchik *et al.*, “The application of acoustic method for diagnostics of structural shapes stress condition”, *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 5, pp. 99–105, 2016 (in Ukrainian). doi: 10.20535/1810-0546.2016.5.77378
18. G.S. Pisarenko *et al.*, *Strength of Materials*. Kyiv, Ukraine: Vyshcha Shkola, 2004 (in Ukrainian).

Г.С. Тимчик, М.В. Філіппова, М.О. Демченко

ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ОДНОВІСНИХ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ У НАВАНТАЖЕНИХ ФАСОННИХ ПРОФІЛЯХ

Проблематика. Стаття присвячена проблемі визначення значень дійсних механічних напружень фасонних профілів металевих конструкцій у процесі експлуатації без розвантаження з використанням акустичного методу контролю.

Мета дослідження. Проведення експериментальних досліджень дійсних механічних напружень у полицях фасонних профілів металевих конструкцій, які перебувають в експлуатації.

Методика реалізації. Для досягнення мети дослідження використано метод акустичної діагностики напружено-деформованого стану фасонних профілів металевих конструкцій, який базується на різницевому методі визначення механічних напружень.

Результати дослідження. Проведено дослідження дійсних механічних напружень фасонних профілів металевих конструкцій промислової споруди, що перебуває в експлуатації. Проведено порівняльний аналіз значень дійсних механічних напружень фасонних профілів з розрахунковими для вибраних точок контролю, в результаті якого встановлено відхилення виміряних значень напружень від розрахункових у межах 2,5–3,5%.

Висновки. Результати експериментальних досліджень і проведеного аналізу значень одноосних механічних напружень, виміряних із використанням системи діагностики напружено-деформованого стану фасонних профілів металевих конструкцій, та напружень, отриманих для тих самих точок розрахунковими методами за прогинами профілів, дали змогу зробити висновки про технічний стан металевих конструкцій промислової споруди на етапі будівництва.

Ключові слова: фасонні профілі; дійсні механічні напруження; металеві конструкції.

Г.С. Тымчик, М.В. Филиппова, М.А. Демченко

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОДНООСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Проблематика. Стаття посвящена проблеме определения значений действительных механических напряжений фасонных профилей металлических конструкций в процессе эксплуатации без разгрузки с использованием акустического метода контроля.

Цель исследования. Проведение экспериментальных исследований действительных механических напряжений в полках фасонных профилей металлических конструкций, находящихся в эксплуатации.

Методика реализации. Для достижения цели исследования использован метод акустической диагностики напряженно-деформированного состояния фасонных профилей металлических конструкций, основанный на разностном методе определения механических напряжений.

Результаты исследования. Проведено исследование действительных механических напряжений фасонных профилей металлических конструкций, находящихся в эксплуатации. Проведен сравнительный анализ значений действительных механических напряжений фасонных профилей с расчетными для заданных точек контроля, в результате которого установлено отклонение измеренных значений напряжений от расчетных в пределах 2,5–3,5 %.

Выводы. Результаты экспериментальных исследований и проведенного анализа значений одноосных механических напряжений, измеренных с использованием системы диагностики напряженно-деформированного состояния фасонных профилей металлических конструкций, и напряжений, полученных для тех же точек расчетными методами по прогибам профилей, позволили сделать выводы о техническом состоянии металлических конструкций промышленного сооружения на этапе строительства.

Ключевые слова: фасонные профили; действительные механические напряжения; металлические конструкции.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського"

Надійшла до редакції
29 серпня 2016 року