

МОНІТОРИНГ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МОСТОВОЇ ПРОЛІТНОЇ СПОРУДИ ПІД ЧАС МОНТАЖУ МЕТОДОМ НАСУВАННЯ

С.М. Мінаков¹, В.М. Учанін²

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: mail@kpi.ua

²Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: vuchanin@gmail.com

Запропоновано методіку моніторингу механічних напружень у стінках пролітної споруди мостів із феромагнітних сталей під час їх монтажу методом насування з застосуванням магнітоанізотропного методу. Для вибору точок вимірювання напружень прогінна будова розглянута у вигляді консольної двохопорної балки, для якої побудовано, зокрема, епюри поперечної сили та згинаючих моментів. Методика реалізована під час будівництва моста через р. Дніпро (м. Київ), результати якої підтвердили її ефективність. Розроблена методика може бути модифікована для моніторингу пролітних споруд мостів із феромагнітних сталей під час їх експлуатації. Бібліогр. 16, рис. 8.

Ключові слова: магнітоанізотропний метод, феромагнітна сталь, моніторинг, механічні напруження, міст, пролітна споруда

Актуальність проблеми і мета роботи. Мости є важливою і критично вразливою складовою транспортної інфраструктури, забезпечення надійності яких є проблемою державного значення через можливі людські, матеріальні і логістичні втрати у випадку аварійних ситуацій. Підтвердженням цієї тези може бути недавня трагічна аварія моста Моранді біля Генуї, причиною якої визначена сукупність чинників, пов'язаних з недостатністю заходів з підтримки технічного стану і додатковим вітровим навантаженням [1]. Останніми десятиріччями досягнуто вражаючий прогрес в розвитку технологій будівництва і експлуатації мостів, що призвело до суттєвого збільшення їх довжини, вантажності, пропускної здатності і надійності. Одночасно формується розуміння важливості моніторингу напружено-деформованого стану мостових конструкцій під час їх виробництва і експлуатації. Для оцінювання технічного стану мостів широко використовують візуальне обстеження. Але дослідження Центру Неруйнівного Контролю Адміністрації Федеральних доріг США показали, що близько 56 % висновків за результатами візуальних обстежень були з ймовірністю 95 % помилковими [2, 3]. Тому сучасним трендом є встановлення багатоканальних систем комплексного моніторингу мостів у реальному часі на основі датчиків різного типу (температури, деформації, нахилу тощо).

Під час будівництва мостів широко використовують економічно ефективні методи повздовжнього насування пролітних споруд (ПС) [4, 5]. На рис. 1 спрощено показано схему насування ПС 1 з використанням аванбеку 4 спеціальної форми, який прикріплюється до передньої частини ПС.

Аванбек 4 за рахунок порівняно невеликої погонної ваги полегшує встановлення ПС на приймальну опору 5. Після монтажу ПС встановлюють на механізми ковзання 2 опори 3 і орієнтують у напрямку приймальної опори 5. Після цього за допомогою тягових механізмів (не показано) ПС 1 насувають на приймальну опору 5 (на рис. 1 напрямком насування показано стрілкою).

Під час насування в елементах ПС виникають напруження і деформації. За існуючих допусків на геометричні параметри ПС це може призводити до аварійних порушень стійкості, перекосів і перевантажень окремих елементів ПС тощо. Для моніторингу процесу насування ПС використовують пристрої різного призначення, які дозволяють за тиском у гідравлічній системі визначати реакцію на опорах або проводити лазерний моніторинг відхилень елементів ПС у процесі насування [6, 7]. Крім того, для визначення напружень в стінках ПС використовують датчик положення, який реєструє відстань між елементами за рахунок деформації ПС. Фактично фіксується зміна відстані між двома елементами з використанням

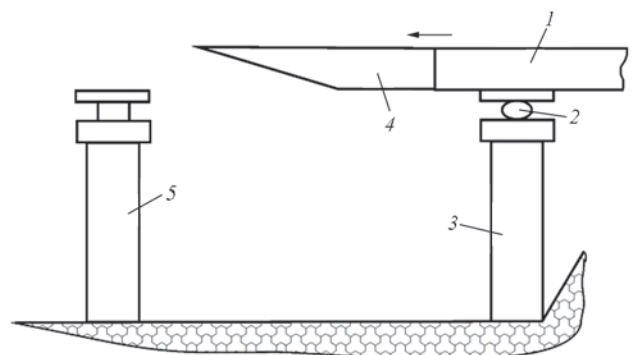


Рис. 1. Схема насування ПС моста: 1 – ПС; 2 – механізм ковзання; 3 – опора; 4 – аванбек; 5 – приймальна опора



Рис. 2. Будівництво залізнично-автомобільного переходу через р. Дніпро на залізничній ділянці Київ-Московський–Дарниця

металевого стрижня, один кінець якого закріплений на конструкції, а інший залишається вільним. Датчики переміщення монтується у наперед визначених місцях конструкції, тобто мають обмежену мобільність. Це не дозволяє вимірювати напруження в критичних зонах, які в процесі насування змінюються.

Для вимірювання напружень в ПС із феромагнітних сталей може бути використаний магнітоанізотропний (МА) метод. МА метод вимірювання напружень базується на дії ефекту Віларі (зворотний магніострикційний ефект), який проявляється впливом робочих і залишкових напружень на магнітну проникність феромагнітних сталей [8–13]. Йдеться про складову магнітної анізотропії, яка обумовлена напруженнями, на відміну від її кристалографічної і текстурної складових [14]. Метод має багато переваг через низькі вимоги до стану контрольованої поверхні, можливість проведення вимірювань через лакофарбові покриття, високу продуктивність і мобільність. Запропонований метод визначення напружень апробовано у 2009 р. під час будівництва залізнично-автомобільного переходу через р. Дніпро у м. Києві на залізничній ділянці Київ-Московський–Дарниця (рис. 2). Проведений нами аналіз показав принципову новизну запропонованого підходу [15]. Роботи проводились в оперативному режимі, коли більшість технічних рішень за відсутності досвіду і відпрацьованої методики приймали інтуїтивно без належного наукового обґрунтування. Тому визначена необхідність подальшого узагальнення отриманого досвіду, результатом якого є ця стаття. Автори вважають, що запропонований підхід є перспективним для моніторингу напружень мостових конструкцій не тільки під час монтажу, а і в умовах їх подальшої експлуатації.

Розробка методики вимірювання напружень під час насування мостових ПС. Для забезпечення жорсткості досліджувана ПС складалася з двох коробчастих конструкцій (КК) висотою 3,2 м та шириною 2,2 м, які зварені у верхньому поясі для формування шляхового полотна (рис. 2). Кожна КК має дві вертикальні стінки. Матеріал ПС – сталь 15ХСНД, товщина вертикальних стінок – 12 мм.

Для моніторингу стабільності ПС під час насування важливо мати можливість порівнювати зміни напружень у вертикальних стінках КК. Адже за

різних розмірів вертикальних стінок виникає ситуація, коли вони сприймають різне навантаження, яке складно (або неможливо) компенсувати під час насування. Під час насування ПС шляхове полотно виставляється горизонтально (по геодаліту) і насувається на приймальну опору. При цьому збільшується довжина консольного вильоту конструкції зі збільшенням її ваги. Задача полягала не тільки у вимірюванні абсолютних значень механічних напружень. Важливо було визначити різницю напружень у вертикальних стінках різних КК в однаковому перерізі.

Для визначення найнавантаженішого перерізу для визначення напружень під час насування розглянемо ПС у вигляді консольної двохопорної балки (рис. 3). Головним навантаженням в нашому випадку є вага конструкції, що показано рівномірно розподіленим навантаженням q . Це навантаження викликає появу реакцій опор R_A та R_B . Згідно до теорії пружності [16] епюри поперечної сили Q_y та згинаючих моментів M_x будуть мати вигляд, представлений на рис. 3.

З епор на рис. 3 видно, що найнебезпечнішою ділянкою ПС є зона опори А, що відповідає переходу ПС на консольну ділянку, в якій Q_y та M_x мають максимальні значення. Під час насування за рахунок збільшення ваги та довжини консольного вильоту напруження в зоні опори А будуть тільки зростати. Тому зона опори А вибрана оптималь-

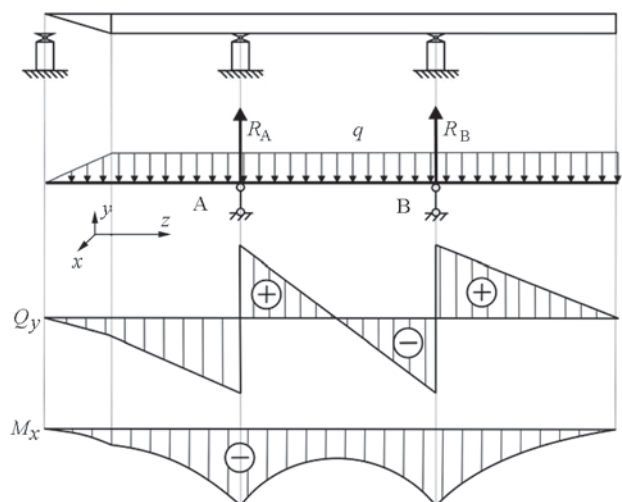


Рис. 3. ПС у вигляді двохопорної консольної балки, навантаження ПС під час насування і епюри поперечних сил Q_y та згинаючих моментів M_x

ною для моніторингу напружень в бічних стінках ПС під час насування.

Для визначення точок визначення напружень на вертикальних стінках КК розглянемо її переріз і відповідні епюри напружень (рис. 4) [16]. З епюр на рис. 4 видно, що в перерізах КК діють нормальні та дотичні напруження. Характер зміни цих напружень по висоті показує, що найбільші нормальні напруження розтягу σ_{\max} мають місце в зоні верхньої кромки бічної стінки КК. В зоні нижньої кромки бічної стінки виникають нормальні напруження стиску. Існує також нейтральна площина, в якій нормальні напруження дорівнюють нулю. Дотичні напруження в нейтральній площині, навпаки, мають максимальне значення τ_{\max} . Зазначимо, що терміни «нормальні» і «дотичні» напруження відносяться традиційно до перерізу КК. Зі сторони бічної стінки нормальні напруження направлені вздовж ПС по координаті z , а дотичні відповідно по координаті y (рис. 3).

Аналіз розподілу напружень на рис. 4 показує, що зони верхньої і нижньої кромки бічної стінки КК слід вважати оптимальними для проведення вимірювань нормальних напружень. В цих місцях дотичні напруження мають найменші значення. Слід врахувати, що проводити вимірювання в зоні верхньої кромки стінки КК в реальних умовах складно. На нижніх кромках бічної стінки можливо вимірювати напруження стиску. Але тут слід зважати на існування залишкових зварювальних напружень, які можуть спотворити результати вимірювань напружень, пов'язаних з процесом насування. Для зменшення впливу залишкових напружень в зоні зварного шва, що з'єднує вертикальну стінку із нижньою полкою, МА перетворювачі встановлювали на відстані 200 мм вгору від нижньої стінки КС, де вимірювані нормальні напруження несуттєво відрізняються від максимальних значень (рис. 5). Крім того, місця встановлення МА перетворювачів вибирали між привареними всередині КК ребрами. Рівень проведення досліджень напруженого стану МА методом у бічних стінках КК показано на рис. 4 віссю P .

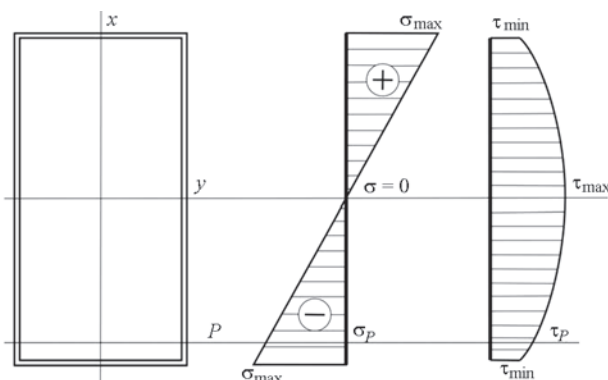


Рис. 4. Переріз КК (схематично) і епюри нормальних σ та дотичних τ напружень

Кожен МА перетворювач за допомогою блока комутації (рис. 6) по чергово підключали до загального приладу типу MESTR-411 [9] через окремий пристрій нормування з функцією запам'ятовування градуовальної кореляційної функції, характерної для кожного окремого МА перетворювача. Це забезпечувало повторюваність вимірювань без переналаштування приладу після кожної комутації.

Згадану градуовальну криву для кожного МА перетворювача отримували з використанням зразків зі сталі 15ХСНД розмірами $500 \times 60 \times 12$ мм з використанням установки чотириточкової (чистого) згину за методикою, наведеною в роботах [11–13]. Для цього МА перетворювач встановлювали у середню частину зразка, де діють тільки напруження стиску. Напруження створювали механічним згином зразка. При цьому рівень напружень розраховували за значеннями прогину зразка. Отримані данні записували у відповідні пристрої нормування (рис. 6), що забезпечувало єдність і повторюваність вимірювань напружень різними МА перетворювачами.

Реалізація методики вимірювання напружень в процесі насування пролітної споруди під час будівництва моста через р. Дніпро. Запропонована методика вимірювання напружень реалізована протягом червня, серпня та вересня 2009 р. в процесі планових насувань ПС під час будівництва залізнично-автомобільного переходу через р. Дніпро у м. Києві на залізничній ділянці Київ-Московський-Дарниця. На середині русла р. Дніпро був намитий острів і збудований стапель для монтажу ПС (рис. 2). По мірі монтажу секцій ПС проводили їх насування на заздалегідь збудовані опори за допомогою потужних гідроциліндрів. За найбільшої довжини

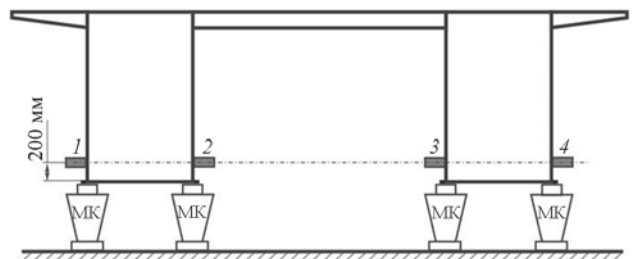


Рис. 5. Схема встановлення МА перетворювачів на стінках КК у поперечному перерізі: 1–4 – МА перетворювачі; МК – механізми ковзання

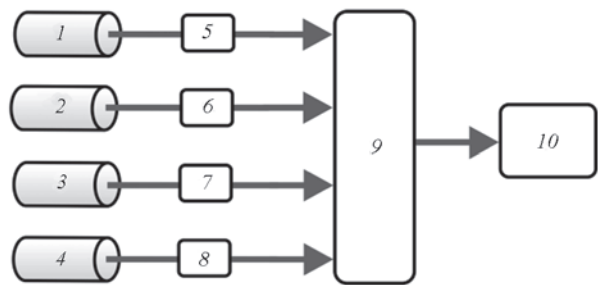


Рис. 6. Схема підключення МА перетворювачів до приладу типу MESTR-411: 1–4 – МА перетворювачі; 5–8 – пристрої нормування; 9 – блок комутації; 10 – прилад MESTR-411



Рис. 7. Кріплення МА перетворювача до стінки КС з приладом MESTR-411 (а) та процес вимірювання напружень (б)

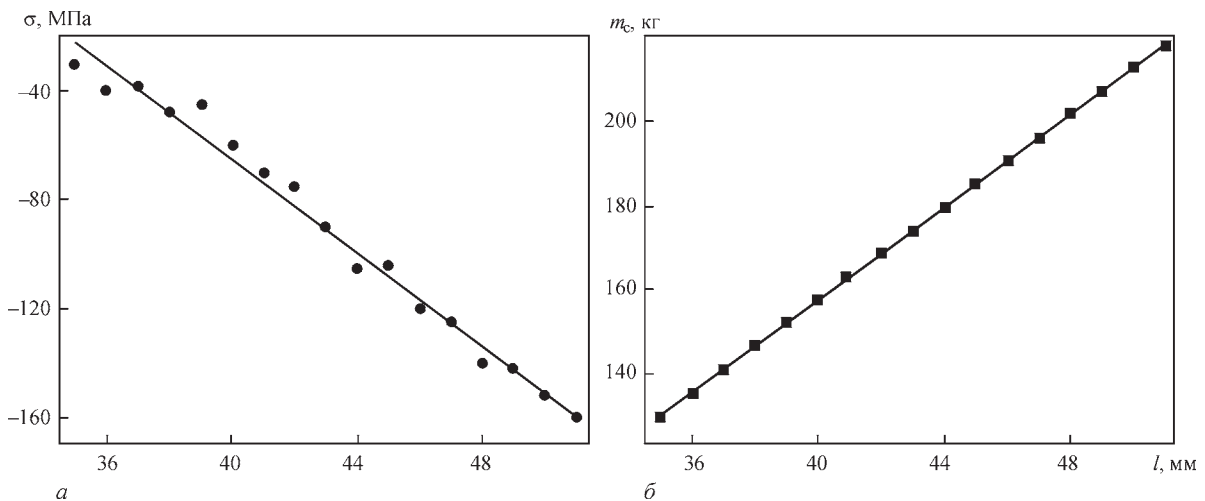


Рис. 8. Порівняння зміни вимірних напружень і розрахункової ваги консольної частини ПС в процесі насування

консолі ПС (приблизно 106 м) її розрахована вага досягала 1000 т. Верхня частина ПС (шляхове полотно) виставляли горизонтально за допомогою телодоліту. При цьому виявилось, що розміри бічних стінок КС мають розбіжності по висоті, через що частина вертикальних стінок не спиралась на механізми ковзання та не сприймала навантаження, а інша частина стінок була навантажена понад розрахункові значення. Для рівномірного розподілу навантажень проводили відповідне налаштування товщини ковзних пластин відповідних механізмів ковзання. Вимірювання напружень бічних стінок ПС проводили під час технологічних зупинок, які обумовлені зворотним ходом гідроциліндрів. Під час таких пауз чотири МА перетворювачі встановлювалися на вертикальні стінки в одному поперечному перерізі ПС за допомогою спеціальних магнітних кріплень (рис. 7), що забезпечувало їх мобільність та ідентичність навантаження ПС під час вимірювання.

На рис. 8 подано залежності вимірних напружень в одній із бічних стінок (а) і розрахованої ваги m_c консольної частини ПС від довжини консолі l (б).

Аналіз поданих на рис. 8 результатів визначення напружень МА методом показав їх чітку кореляцію з розрахованими значеннями ваги консольної частини ПС.

Висновки

1. Подано елементи методики МА моніторингу напружень у стінках ПС мостів із феромагнітних сталей під час їх монтажу методом насування.

2. Методика МА моніторингу пройшла дослідно-промислову перевірку під час будівництва моста через р. Дніпро (м. Київ), результати якої показали її ефективність щодо вибору зони розташування МА перетворювачів, їх комутації та нормування сигналів.

3. МА метод вимірювання напружень та відповідна методика вимірювання можуть бути рекомендовані для моніторингу напружень мостових ПС із феромагнітних сталей під час їх монтажу.

4. Розроблена методика може бути модифікована для моніторингу пролітних споруд мостів із феромагнітних сталей під час їх експлуатації.

Список літератури

1. Burlando M., Romanic D., Boni G. et al. (2019) Investigation of the weather conditions during the collapse of the Morandi Bridge in Genoa on 14 August 2018 (Preprint). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **45**. <http://doi.org/10.5194/nhess-2019-371>.
2. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Нигаматова О.И., Михалдыкин Е.С. (2014) Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 1. Международный и отечественный опыт применения монито-

- ринга. *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*, 1, 1 (вільний доступ: <http://t-s.today/PDF/01TS114.pdf>).
3. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Нигаматова О.И., Михалдыкин Е.С. (2014) Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений. *Там же*, 1, 2 (вільний доступ: <http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf>).
 4. Пестряков А.Н. (2010) *Продольная и поперечная надвижка: метод, указания*. Екатеринбург, УрГУПС.
 5. Каньшин Е. (2010) Строительство мостов по технологии циклической продольной надвижки. Опыт Германии. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 33, 106–110.
 6. Наянов В.И., Наянов Ю.В. (2007) Современные технологии контроля в строительстве внеклассных мостов. *Транспортное строительство*, 1, 86–87.
 7. Наянов В.И., Наянов Ю.В. (2009) *Компьютерная система слежения на строительстве крупных мостовых переходов. Учебно-методическое пособие к курсу «Автоматизированные системы мониторинга»*. ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет. им. Н.Г. Чернышевского».
 8. Yamada H., Uchiyama S., Takeuchi et al. (1987) Noncontact Measurement of Bending Stress Using a Magnetic Anisotropy Sensor. *IEEE Transactions on Magnetics*, Mag-23, 5, 2422–2424.
 9. Фомичев С.К., Минаков С.Н., Данильчик А.В. и др. (1998) Измеритель механических напряжений серии MESTR-41x. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 58–60.
 10. Фомичев С.К., Минаков С.Н., Михалко С.В. и др. (2009) Определение силовых воздействий на трубопровод по анализу эпюр распределения продольных напряжений. *Там же*, 2, 11–14.
 11. Учанін В.М., Мінаков С.М. (2018) Вплив механічних напружень на сигнал вихрострумowego перетворювача магнітної анізотропії. *Там само*, 1, 21–25.
 12. Uchanin V., Minakov S., Nardoni G. et al. (2017) Eddy current method for evaluation of stresses in steel components. *Proceeding of 14th Intern. conf. «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering»*, September 4–6, 2017, Bernardin, Slovenia, pp. 207–212.
 13. Uchanin V., Minakov S., Nardoni G. et al. (2018) Determination of Stresses in Steel Components by Eddy Current Method. *Journal of Mechanical Engineering*, 64, 11, 690–697. doi:10.5545/sv-jme.2018.5208.
 14. Tumanski S. (2011) *Handbook of Magnetic Measurements*. Boca Raton Florida, CRC Press.
 15. Учанін В.М., Мінаков С.М., Фомичов С.К., Мінаков А.С., Бобін Б.О. (2017) *Спосіб подовжнього насування пролітної конструкції під час будівництва мостів*. Україна Пат. № 116454. МПК E01D21/06. Заявл. 11.11.16. Опубл. 25.05.2017. Бюл. № 10.
 16. Реут Л. (2016) *Плоский поперечный изгиб: пособие по учебной дисциплине «Механика материалов»*. Минск, БНТУ.
- ing the collapse of the Morandi Bridge in Genoa on 14 August 2018. *Natural Hazards and Earth System Sci.* <http://doi.org/10.5194/nhess-2019-371>.
2. Ovchinnikov, I.G., Ovchinnikov, I.I., Nigmatova, O.I., Mikhaldykin, E.S. (2014) Strength monitoring of bridge-works and peculiarities of its application. Pt 1: International and national experience of application of monitoring. *Internet-J.: Transportnye Sooruzheniya*, 1(1) [in Russian]. <http://t-s.today/PDF/01TS114.pdf>.
 3. Ovchinnikov, I.G., Ovchinnikov, I.I., Nigmatova, O.I., Mikhaldykin, E.S. (2014) Strength monitoring of bridge-works and peculiarities of its application. Pt 2: Continuous monitoring of state of bridgeworks. *Internet-J.: Transportnye Sooruzheniya*, 1(2) [in Russian]. <http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf>.
 4. Pestrjakov, A.N. (2010) Longitudinal and transverse sliding: method, recommendations. Ekaterinburg, UrGUPS [in Russian].
 5. Kanshin, E. (2010) Bridge construction by the technology of cyclic longitudinal sliding. Experience of Germany. *Visnyk DNUZT*, Issue 33, 106–110 [in Russian].
 6. Nayanov, V.I., Nayanov, Yu.V. (2007) Modern control technologies in construction of out-of-class bridges. *Transportnoe Stroitelstvo*, 1, 86–87 [in Russian].
 7. Nayanov, V.I., Nayanov, Yu.V. (2009) Computer tracking system in construction of large bridges. In: Training guide for the course on «Automated monitoring systems». GOU VPO Saratov State Un-ty [in Russian].
 8. Yamada, H., Uchiyama, S., Takeuchi et al. (1987) Noncontact measurement of bending stress using a magnetic anisotropy sensor. *IEEE Transact. on Magnetics*, 23(5), 2422–2424.
 9. Fomichev, S.K., Minakov, S.N., Danilchik, A.V., Tarnikov, V.G., Yaremenko, M.A. (1998) Mechanical stress meter of MESTR-41x series. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 58–60 [in Russian].
 10. Fomichev, S.K., Minakov, S.N., Mikhalko, S.V., Yaremenko, M.A., Minakov, A.S. (2009) Determination of force impacts on a pipeline by analysis of longitudinal stress distribution eures. *Ibid.*, 2, 11–14 [in Russian].
 11. Uchanin, V.M., Minakov, S.M. (2018) Influence of mechanical stresses on the signal of eddy current transducer of magnetic anisotropy. *Ibid.*, 1, 21–25 [in Ukrainian].
 12. Uchanin, V., Minakov, S., Nardoni, G., Ostash, O., Bentoglio, M. (2017) Eddy current method for evaluation of stresses in steel components. In: Proc. of 14th Intern. Conf. on Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering (September 4–6, 2017, Bernardin, Slovenia), 207–212.
 13. Uchanin V., Minakov, S., Nardoni, G., Ostash, O., Fomichov, S. (2018) Nondestructive determination of stresses in steel components by eddy current method. *J. of Mechanical Engineering*, 64(11), 69–697. doi:10.5545/sv-jme.2018.5208.
 14. Tumanski, S. (2011) Handbook of magnetic measurements. Boca Raton Florida, CRC Press.
 15. Uchanin V.M., Minakov, S.M., Fomichov, S.K., Minakov, A.S., Bobin, B.O. Method of longitudinal sliding of bridge span structure during construction of bridges. Pat. Ukraine 116454, Int. Cl. E01D21/06; fil. 11.11.16, publ. 25.05.2017 [in Ukrainian].
 16. Reut, L. (2016) *Plane transverse bending. In: Manual on Mechanics of Materials*. Minsk, BNTU [in Russian].

References

MONITORING THE STRESSED STATE OF BRIDGE SPAN STRUCTURE DURING MOUNTING BY SLIDING METHOD

S.M. Minakov¹, V.M. Uchanin²

¹NTU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Prosp. Peremohy, 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: mail@kpi.ua

²G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

A procedure is proposed for monitoring mechanical stresses in the walls of the span structure of bridges from ferromagnetic steels during their mounting by the sliding method with application of magnetoanisotropic method. In order to select the measurement points, the span structure was considered as a cantilever double support beam, for which the curves of the transverse force and bending moments were plotted, in particular. The procedure was realized during construction of a bridge across the Dnipro (Kyiv), the results of which confirmed its effectiveness. The developed procedure can be modified for monitoring the span structures of bridges from ferromagnetic steels during their operation.

Keywords: magnetoanisotropic method, ferromagnetic steel, monitoring, mechanical stresses, bridge, span structure

Надійшла до редакції 02.09.2020