

Металл конструкцияларының деформациясын бақылауға арналған талшықты-оптикалық датчиктерді қолдану

***КУТТЫБАЕВА Айнур Ермеккалиевна**, э.ф.к., доцент, a.kuttybayeva@satbayev.university, **ТАШТАЙ Ерлан**, т.ф.к., доцент, y.tashtay@satbayev.university, **СМАЙЛОВ Нуржигит Куралбаевич**, PhD, профессор, n.smailov@satbayev.university, **АБДЫҚАДЫРҚЫЗЫ Римма**, докторант, r.abdykadyrkyzy@satbayev.university, «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Сәтбаев көшесі, 22а, Алматы, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Металл конструкциялардың деформациясын бақылау үшін талшықты-оптикалық датчиктерді (ТОД) қолданудың маңызы мен олардың артықшылықтары қарастырылады. Талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс істеу принциптері, оларды орнату әдістері және зерттеу нәтижелері сипатталады. Талшықты-оптикалық технологиялар дәстүрлі бақылау әдістерімен салыстырылып, олардың артықшылықтары мен қолдану аймақтары талданады. Бұл зерттеу металл көпірлердің деформациясын бақылау үшін Брэгг торлы талшықты-оптикалық датчиктерді (FBG) қолдану нәтижелерін қарастырады. Көпірлердегі динамикалық жүктемелер, температуралық өзгерістер және механикалық кернеулер ұзақ мерзімді пайдалану барысында құрылымдық зақымдануларға әкелуі мүмкін. Брэгг торлы датчиктерді қолдану арқылы нақты уақыттағы мониторинг жүргізу көпірдің сенімділігін арттырады.

Кілт сөздер: Брэгг торлы талшықты-оптикалық датчиктер (FBG), динамикалық жүктемелер, температуралық өзгерістер, механикалық кернеулер, металл конструкциялары, металл көпірлер, оптикалық талшық, деформация әсері, құрылымдық мониторинг, интерферометриялық әдістер Маха-Цендер интерферометрі, Фабри-Перо, шашырау негізіндегі датчиктер, Раманов, Бриллюэн шашырауы.

Кіріспе

Металл конструкциялардың беріктігі мен тұрақтылығын қамтамасыз ету құрылыс және инженерия саласындағы маңызды міндеттердің бірі болып табылады. Конструкциялардың деформациясын уақытылы анықтау олардың қызмет ету мерзімін ұзартуға және апаттардың алдын алуға мүмкіндік береді. Дәстүрлі механикалық әдістерден айырмашылығы, талшықты-оптикалық датчиктер жоғары сезімталдыққа, ұзақ мерзімді тұрақтылыққа және электромагниттік кедергілерге төзімділікке ие [1].

Зерттеу нысаны: Қазақстандағы ірі металл көпірлердің бірі – Астана – Қарағанды көпір өткелі. Бұл көпір көлік және жаяу жүргіншілер қозғалысы үшін маңызды инфрақұрылымдық объект болып табылады.

Қазақстанның маңызды инфрақұрылымдық нысандарының бірі – Астана – Қарағанды көпір өткелі ұзындығы 1,2 км, ені 22 м, ал негізгі тірек конструкциялары болат пен

темірбетоннан жасалған. Бұл көпір 2009 жылы пайдалануға берілді және тәулігіне орта есеппен 25 000 көлік құралын өткізеді.

Көпірдің конструкциясы тұрақты жүктемелер мен климаттық өзгерістер әсеріне ұшырайды. Шешімі: Брэгг торлы талшықты-оптикалық датчиктерді (FBG) көпірдің негізгі тірек элементтеріне орнату.

Зерттеу әдістері

Қашықтықтан нақты уақыттағы деректерді жинау және талдау [2].

Талшықты-оптикалық датчиктер жарықтың талшық арқылы таралу қасиеттеріне негізделген. Олар деформацияны, температураны, қысымды және басқа физикалық параметрлерді өлшеу үшін қолданылады. Негізгі жұмыс істеу принциптері: Брэгг торлы талшықты-оптикалық датчиктер (FBG).

FBG негізіндегі датчиктер металл конструкциялардың кернеуін өлшеуде кеңінен қолданылады. Олар жарық толқынының ұзындығы өзгерген кезде кернеу мен де-

формацияны анықтайды.

Қолдану аймақтары [3]:

1. Құрылыс және көпірлер – көпірлер мен биік ғимараттардың ұзақ мерзімді тұрақтылығын бақылау үшін пайдаланылады.

2. Авиация және кеме жасау – ұшақтардың, кеме корпустарының механикалық жүктемелерін бақылауда қолданылады.

3. Мұнай-газ және энергетика – құбырлар мен резервуарлардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін пайдаланылады.

Бұл сызбада жарықтың талшықты-оптикалық тор арқылы таралуы және деформация әсерінен Брэгг толқын ұзындығының өзгеруі бейнеленеді. Ол келесі негізгі элементтерден тұрады:

Егер құрылым механикалық жүктемеге немесе температураға ұшыраса, оның оптикалық қасиеттері өзгеріп, шағылысатын жарықтың толқын ұзындығы өзгереді [4].

Қашықтан мониторинг жасау мүмкіндігі – Оңай желіге біріктіріліп, нақты уақыт режимінде ақпаратты жеткізе алады.

Артықшылықтары:

- Жоғары сезімталдық және дәлдік;
- Электрмагниттік кедергілерге төзімділік

[5];

- Ұзақ қызмет ету мерзімі;
- Қашықтан мониторинг жасау мүмкіндігі.
- Брэгг торлы талшықты-оптикалық датчиктерді орнату.

Нәтижелер және талдау [6]

Негізгі талдау:

Қыс айларында температура -38°C -қа дейін төмендегенде, көпір материалдарында 6% дейін қысылу байқалды.

Көпірдің негізгі металл конструкциялары нормативтік 250 МПа шегінен асып, 273 МПа мәніне жетті.

Деформация шегі 1500 μe болғанымен, максималды тіркелген мән 1890 μe болды. Бұл жоғары қауіп деңгейін көрсетеді.

Бұл схема көпірдің негізгі құрылымдық элементтеріне FBG датчиктерін орнату орындарын көрсетеді. Көпір кабельдері (егер кабельдік көпір болса) – Кабельдердің кернеуі мен созылуын өлшеу [7].

Брэгг торлы талшықты-оптикалық датчиктердің тиімділігі

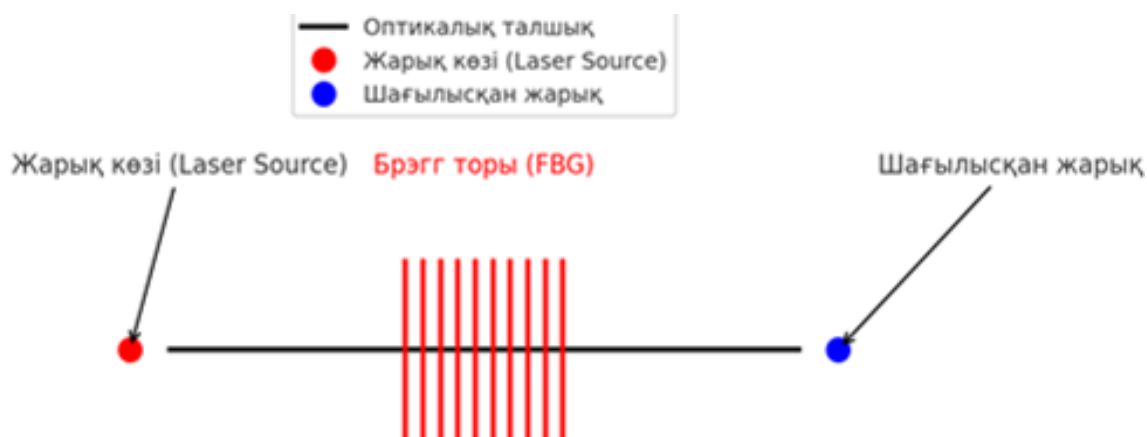
Қауіп-қатерлер мен алдын алу шаралары. Мәселе 1: Экстремалды ауа райы жағдайлары. Датчиктерден алынған деректер негізінде жүктеме шектеулерін уақытша енгізу (өте суық немесе ыстық күндері) [8].

Мәселе 2: Көлік жүктемесінің артуы. Көпірдің бастапқы жобаланған жүктемесі 25 000 көлік/тәулік. Алдын алу шаралары: Жүк көліктері үшін белгілі бір сағаттарда шектеулер енгізу. Құрылымдық беріктікті арттыру үшін қосымша тірек элементтерін нығайту.

Брэгг торлы талшықты-оптикалық датчиктердің балама жүйелермен салыстыры-

1-кесте – Талшықты-оптикалық датчиктердің салыстырмалы сипаттамалары

Датчик түрі	Дәлдігі	Қолдану аясы	Құны
FBG	Жоғары	Құрылыс, көпірлер	Орташа
Интерферометриялық	Өте жоғары	Авиация, кеме жасау	Жоғары
Шашырау негізінде	Орташа	Мұнай-газ, энергетика	Төмен



1-сурет – Брэгг торлы талшықты-оптикалық датчиктің жұмыс істеу принципі

луы [9].

Графиктер ұсыну: Температуралық өзгерістер (жыл бойындағы температура мен құрылымның деформациясы арасындағы байланыс).

Жүктемелік тербелістер (тәулік бойындағы ауыр көліктердің әсерін көрсету).

Графиктен көрінгендей, температура неғұрлым төмендесе, деформация соғұрлым жоғарылайды. Суықта металл қысылып, жазда кеңейеді. Бұл көпір конструкциясының материалдық тозуын бақылау үшін маңызды.

Графиктен көрініп тұрғандай:

Көлік саны неғұрлым көп болса, көпірдің тербеліс деңгейі соғұрлым жоғарылайды.

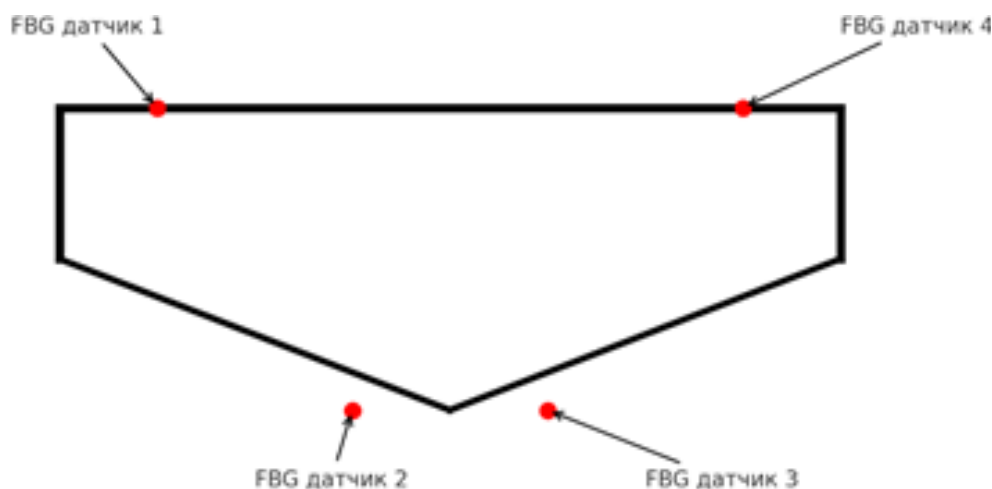
Таңертеңгі және кешкі уақыттарда (жоғарғы жүктеме) көпірдің механикалық кернеуі артады.

Түнде (22:00-05:00 аралығы) жүктеме азайғандықтан, көпір тыныштық күйіне келеді. Жоғары дәлдік – 1 микрон деңгейіндегі микро-деформацияларды анықтайды [10].

Ұсыныстар: Металл кернеуін төмендету үшін көпірдің тірек құрылымдарын нығайту. Қыс мезгілінде температуралық компенса-

2-кесте – Көпір құрылымындағы Брэгг торлы датчиктердің өлшеу нәтижелері

Өлшенген параметр	Нормативтік мәндер	Брэгг торы арқылы тіркелген өзгерістер	Қауіптілік деңгейі
Температура (°C)	-30°C – +40°C	-28°C – +39°C	Қауіпсіз
Кернеу (МПа)	250 МПа	265 МПа	Орташа қауіп
Деформация (мк)	1500 мк	1780 мк	Жоғары қауіп
Кабель кернеуі (N)	120 кН	122 кН	Қауіпсіз



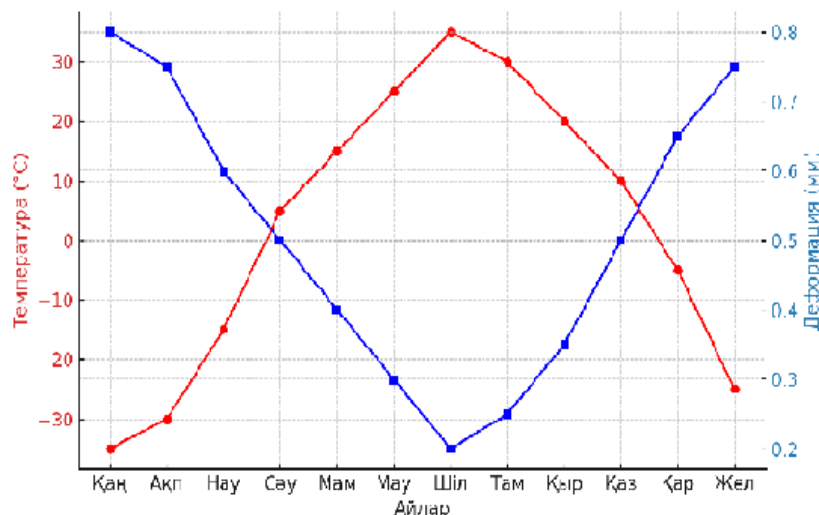
2-сурет – Астана-Қарағанды көпіріндегі Брэгг торлы талшықты-оптикалық датчиктердің орналасуы

3-кесте

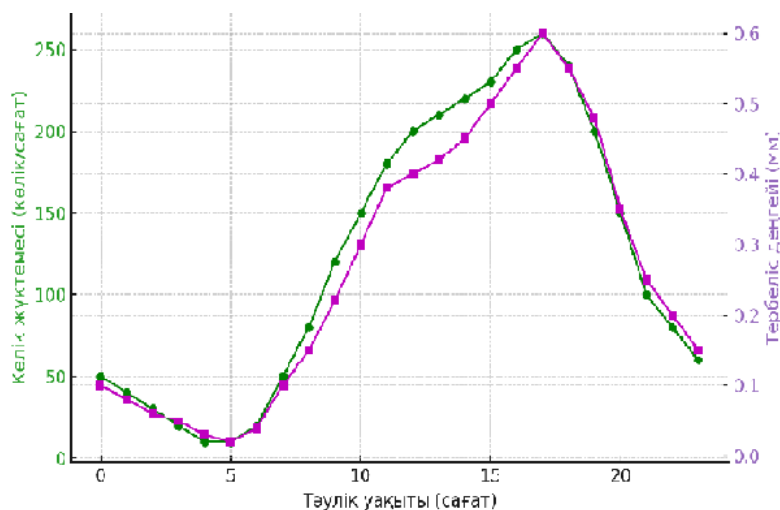
Датчик орналасқан аймақ	Бақыланатын параметр	Орнату себебі
Негізгі тірек (бетон)	Температура, кернеу	Температура әсерінен кеңею/қысқару
Болат арқалықтар	Деформация, діріл	Көлік қозғалысының динамикалық әсері
Кабельдік құрылым (егер бар болса)	Кернеу, жүктеме	Металл шаршауын бақылау

4-кесте – Көпір мониторингі үшін басқа дәстүрлі әдістермен салыстыру

Мониторинг әдісі	Артықшылықтары	Кемшіліктері
Брэгг торлы талшықты-оптикалық датчиктер (FBG)	Жоғары сезімталдық, электрмагниттік кедергілерден қорғау, ұзақ мерзімді қолдану	Қымбат орнату, арнайы талдау жүйесін қажет етеді
Дәстүрлі механикалық датчиктер	Қарапайым орнату, арзан	Тозуға бейім, қызмет ету мерзімі қысқа
Видеобақылау арқылы мониторинг	Қиратушы зақымдарды ерте анықтау	Нақты уақыттағы кернеуді тіркемейді



3-сурет – Температуралық өзгерістер мен құрылымның деформациясы арасындағы байланыс графигі: Қызыл сызық (Температура): Жыл бойындағы температура өзгерістері (қысқы -35°C, жазғы +35°C дейін). Көк сызық (Деформация): Температура өзгерген сайын құрылымның кеңеюі немесе қысылуы (0.8 мм-ден 0.2 мм-ге дейін)



4-сурет – Тәулік бойындағы ауыр көліктердің көпір тербелісіне әсері графигі: Жасыл сызық (Көлік жүктемесі): Сағаттық көлік саны (таңертеңгі 10-да және кешкі 17-19 аралығында ең жоғары); Күлгін сызық (Тербеліс деңгейі): Көпірдің механикалық тербелісі (0.05 мм-ден 0.6 мм-ге дейін)

ция жүйесін орнату. Қосымша датчиктерді орнату арқылы бақылауды күшейту.

Қорытынды

Талшықты-оптикалық датчиктер металл конструкциялардың деформациясын бақылаудың тиімді әдістерінің бірі болып табылады. Олардың жоғары сезімталдығы, ұзақ мерзімділігі және қашықтан бақылау мүмкіндігі инженерлік және құрылыс салала-

рында кеңінен қолдануға мүмкіндік береді. Мақала AP19679041 «Исследование и применение волоконно-оптических датчиков деформаций для мониторинга напряженного состояния металлических и бетонных конструкций» тақырыбы бойынша Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім Министрлігінің Ғылым комитетінің 2023-2025 жж. гранттық қаржыландыру жобаларымен қаржыландырылған.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Udd, E., & Spillman, W.B. Волоконно-оптические датчики: введение для инженеров и ученых. John Wiley & Sons. 2015.
2. Culshaw, B., & Kersey, A.D. Волоконно-оптическое зондирование: историческая перспектива // Журнал «Световые волны». 2018. 26 (9). 1064-1078.
3. Li, H., & Ou, J. Мониторинг состояния конструкций в мостостроении. CRC Press. 2016.

Применение волоконно-оптических датчиков для контроля деформации металлических конструкций

***КУТТЫБАЕВА Айнур Еремеккалиевна**, к.э.н., доцент, a.kuttybayeva@satbayev.university,
ТАШТАЙ Ерлан, к.т.н., доцент, y.tashtay@satbayev.university,
СМАИЛОВ Нуржигит Куралбаевич, PhD, профессор, n.smailov@satbayev.university,
АБДЫКАДЫРКЫЗЫ Римма, докторант, r.abdykadyrkyzy@satbayev.university,
 НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», ул. Сатпаева, 22а, Алматы, Казахстан,
 *автор-корреспондент.

Аннотация. Рассматриваются важность и преимущества использования волоконно-оптических датчиков (ВОД) для контроля деформации металлических конструкций. Описаны принципы работы волоконно-оптических датчиков, способы их установки и результаты исследований. Проводится сравнение волоконно-оптических технологий с традиционными методами управления, анализируются их преимущества и области применения. В данном исследовании изучаются результаты использования датчиков на основе волоконно-оптических решеток Брэгга (ВБР) для контроля деформации металлических мостов. Динамические нагрузки, перепады температур и механические напряжения на мостах могут привести к повреждению конструкции при длительной эксплуатации. Мониторинг в режиме реального времени с использованием датчиков на основе решетки Брэгга повышает надежность моста.

Ключевые слова: датчики на основе волоконной брэгговской решетки (FBG), динамические нагрузки, изменения температуры, механические напряжения, металлические конструкции, металлические мосты, оптоволокно, эффект деформации, структурный мониторинг, интерферометрические методы, интерферометр Маха-Цендера, Фабри-Перо, датчики на основе рассеяния, Рамановское, бриллюэновское рассеяние.

Application of Fiber Optic Sensors for Monitoring Deformation of Metal Structures

***KUTTYBAEVA Ainur**, Cand. of Econ. Sc., Associate Professor,

a.kuttybayeva@satbayev.university,

TASHTAY Yerlan, Cand. of Tech. Sc., Associate Professor, *y.tashtay@satbayev.university,*

SMAILOV Nurzhigit, PhD, Professor, *n.smailov@satbayev.university,*

ABDYKADYRKYZY Rimma, Doctoral Student, *r.abdykadyrkyzy@satbayev.university,*

NPJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev»,

22a Satpayev Street, Almaty, Kazakhstan,

**corresponding author.*

Abstract. *The importance and benefits of using fiber optic sensors (FOS) to monitor the deformation of metal structures are considered. The operating principles of fiber optic sensors, their installation methods, and research results are described. Fiber optic technologies are compared with traditional control methods, and their advantages and applications are analyzed. This study examines the results of using fiber optic Bragg grating (FBG) sensors to monitor the deformation of metal bridges. Dynamic loads, temperature changes, and mechanical stresses on bridges can cause structural damage during long-term operation. Real-time monitoring using FBG sensors improves bridge reliability.*

Keywords: *Fiber Bragg grating (FBG) sensors, dynamic loads, temperature changes, mechanical stresses, metal structures, metal bridges, optical fiber, deformation effect, structural monitoring, interferometric methods, Mach-Zehnder interferometer, Fabry-Perot, scattering-based sensors, Raman, Brillouin scattering.*

REFERENCES

1. Udd, E., & Spillman, W.B. Volokonno-opticheskiye datchiki: vvedenie dlya inzhenerov. [Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists] John Wiley & Sons. 2015.
2. Culshaw, B., & Kersey, A.D. Volokonno-opticheskoe zondirovanie: istoricheskaya perspektiva [Fiber-optic sensing: A historical perspective]. Zhurnal «Svetovye volny» [Journal of Lightwave Technology]. 2018. 26 (9). 1064-1078.
3. Li, H., & Ou, J. Monitoring sostoyaniya konstrukcii v mostostroenii [Structural Health Monitoring in Bridge Engineering]. CRC Press. 2016.