ӘОЖ 621.2 **DOI 10.52167/1609-1817-2024-133-4-353-367**

Н.К. Смайлов, А.Е. Куттыбаева, А.О. Толеманова✉, Қ.М. Ысырайыл, Б.Н. Секенов
Satbayev University, Алматы, Қазақстан
E-mail: tolemanova@gmail.com

ҚАЛА ҒИМАРАТТАРЫНДА ТАЛШЫҚТЫ-ОПТИКАЛЫҚ СЕНСОРЛАРЫН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа. Талшықты-оптикалық сенсорлар олардың ықшам өлшемдерінің арқасында құрылымдарды бақылау үшін құнды екенін дәлелдеді, бұл оларды құрылымдық элементтердің ішіне енгізуге мүмкіндік береді. Оптикалық талшықты өндірудегі жетістіктер азаматтық құрылымдардың жағдайын бағалауға арналған күрделі сенсорлық жүйелердің дамуына әкелді. Біздің зерттеуіміз деформацияны, кернеуді және температураны өлшеуде жоғары сезімталдық пен дәлдік көрсететін құрылымдық талшықты-оптикалық сенсорларды жасауға бағытталған. Құрылымдық элементтер үшін осы параметрлерді анықтауда осы сенсорлардың тиімділігін көрсететін бірнеше мысалдар ұсынылған. Талшықты-оптикалық сенсорларды құрылымдарға біріктіру арқылы біз олардың денсаулығы мен тұтастығын үздіксіз бақылай аламыз. Бұл нақты уақыттағы деректер қауіпсіз, икемді және берік азаматтық инфрақұрылымға үлес қоса отырып, алдын ала техникалық қызмет көрсетуге және ықтимал мәселелерді ерте анықтауға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер. Смартты құрылымдарды бақылауға арналған талшықты-оптикалық сенсорлар: кернеу, деформация және температура.

Кіріспе.

Азаматтық инфрақұрылымның қауіпсіздігі мен тұтастығын қамтамасыз ету қаланың тұрақты дамуы үшін өте маңызды. Талшықты-оптикалық қысым сенсорлары құрылымдық денсаулықты нақты уақытта бақылау үшін қуатты құрал ретінде пайда болды. Бұл сенсорларды құрылымдарға енгізу арқылы инженерлер қысымның өзгеруін үздіксіз бақылай алады, бұл жарықтар, коррозия немесе шамадан тыс жүктелу сияқты ықтимал мәселелерді көрсете алады. Бұл нақты уақыттағы деректер проактивті қызмет көрсетуге және проблемаларды ерте анықтауға, апатты сәтсіздіктердің алдын алуға және азаматтардың қауіпсіздігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Талшықты-оптикалық қысым сенсорлары дәстүрлі бақылау әдістеріне қарағанда бірнеше артықшылықтарды ұсынады. Олар шағын және жеңіл, құрылымдарға оңай біріктіруге мүмкіндік береді. Олар сондай-ақ электромагниттік кедергілерге төзімді және қатал ортада да дәл өлшеулерді қамтамасыз ете алады.

Талшықты-оптикалық қысым датчиктерінің мүмкіндіктерін пайдалана отырып, қалалар өзін-өзі білетін және оның жағдайын нақты уақытта жеткізе алатын «ақылды» инфрақұрылым жасай алады. Бұл біздің салынған қоршаған ортаны басқару және сақтау тәсілімізде төңкеріс жасап, қауіпсіз, икемді және орнықты қалаларға әкеледі.

Бұл мақалада қалалық құрылыстарға бейімделген талшықты-оптикалық қысым датчиктерінің модельдерін зерттеу және әзірлеу саласындағы соңғы жетістіктер қаралады. Біз дәстүрлі мониторинг әдістерінің алдында тұрған мәселелерді, нақты уақыт режимінде мониторингтің маңыздылығын және осы мәселелерді шешудегі талшықты-оптикалық датчиктердің әлеуетін талқылаймыз. Сонымен қатар, біз зерттеудің мақсаттарын, әдістемелерін, қорытындылары мен салдарын зерттейміз.

Материалдар мен тәсілдер.

Оптикалық талшықтар - бұл жарықты ұзақ қашықтыққа өткізе алатын шыныдан немесе пластиктен жасалған жұқа, икемді жіптер. Дәстүрлі электр сымдарынан айырмашылығы, оптикалық талшықтар деректерді тасымалдау үшін жарық сигналдарын пайдаланады. Бұл үлкен көлемдегі ақпаратты әлдеқайда жылдам және тиімдірек беруге мүмкіндік береді. Оптикалық талшықтар адамның шашындай болады, бұл оларды тар кеңістіктерде және күрделі желі конфигурацияларында қолдануға өте ыңғайлы етеді. Бұл технология жоғары жылдамдықты интернетке, ағындық қызметтерге және жетілдірілген телекоммуникация жүйелеріне мүмкіндік беретін байланыс және ақпаратқа қол жеткізу жолында төңкеріс жасады.

Оптикалық талшықтар, шыныдан немесе пластиктен жасалған жұқа жіптер ақпарат беруде төңкеріс жасады. Олар жоғары жылдамдықтағы деректерді тасымалдауға және дыбысты бұрмалаусыз шығаруға мүмкіндік беретін жарық сигналдарын ұзақ қашықтыққа тасымалдайды. Қалааралық телекоммуникациялар үшін пластикалық талшықтарға қарағанда шыны талшықтар оптикалық әлсіреуінің төмен болуына байланысты артықшылық береді, бұл ұзақ қашықтықтарда сигналдың жоғалуын азайтады сол себепті өзекті болып отыр. Бүгінгі таңда оптикалық талшықтар әртүрлі салаларда, соның ішінде медициналық бейнелеу, автомобиль жүйелері және авиацияда маңызды компоненттер болып табылады. Олар жоғары жылдамдықты интернетті, ағындық қызметтерді және жетілдірілген телекоммуникациялық жүйелерді жасай отырып, біздің байланыс және ақпаратқа қол жеткізу жолымызды өзгертті [1].

Осы зерттеуде талшықты-оптикалық байланыста талшықтардың екі негізгі түрі қолданылады: көпмодалы және бірмодалы түрлері. Көпмодалы талшықтар қысқа қашықтыққа қолданылады (500 метрге дейін), жарықтың өтуіне азырақ қатаң талаптар қойылады, қымбат емес компоненттер болып табылады.Бір модты талшықтар ұзақ қашықтыққа қолданылады, жарықтың өтуіне неғұрлым қатаң талаптар қойылады, қымбат компоненттер болып табылады. Талшықты-оптикалық байланыс жүйесі әдетте мыналарды қамтиды: таратқыш: сигналдарды шығарады және кодтайды, оптикалық талшық: сигналдарды қашықтыққа жібереді, оптикалық регенератор: ұзақ қашықтықтағы сигналдарды күшейтеді, оптикалық қабылдағыш: сигналдарды қабылдайды және декодтайды. Бір модты талшықтар сигналдың аз жоғалуына байланысты қалааралық байланыс үшін артықшылық береді. Дегенмен, бірмодалы талшықтармен пайдаланылатын құрамдас бөліктер, әдетте, көпмодалы талшықтармен пайдаланылатындарға қарағанда қымбатырақ.

Оптикалық талшықтар әдетте оптикалық кабельдерді қалыптастыру үшін біріктіріледі, содан кейін олар сыртқы қабықпен қорғалады. Жеке оптикалық талшық үш негізгі компоненттен тұрады: өзек - жарық таралатын талшықтың орталық бөлігі, қаптау - сыну көрсеткіші сәл төмен ядроны қоршап тұрған қабат. Бұл жарықтың өзекке кері шағылысып, сыртқа ағып кетуіне жол бермейді. Буферлік жабын - талшықты зақымданудан және ылғалдан қорғайтын қаптаманың айналасындағы қорғаныс қабаты. Буферлік жабын қаптамаға қарағанда жоғары сыну көрсеткішіне ие, бұл жарықтың ішке қарай шағылуын және талшық бойымен зигзаг жолымен жүруін қамтамасыз етеді. Бұл жарықтың ағып кетуіне байланысты сигналдың жоғалуын болдырмайды.

Оптикалық талшықтар екі негізгі түрге бөлінеді: бір режимді және көп режимді болып бөлінеді. Бір режимді талшықтар кіші өзек диаметрі 9 микрон, инфрақызыл лазер сәулесін жіберу 1300-1550 нм. Көп режимді талшықтар үлкенірек өзек диаметрі 62,5 микрон, жарықдиодтардан инфрақызыл сәулені жіберу 850-1300 нм. Бұған қоса, жарықдиодты шамдардан көрінетін қызыл жарықты-650 нм өткізетін одан да үлкен өзектері-1 мм бар пластикалық оптикалық талшықтар бар.

Мыс сымдармен салыстырғанда оптикалық талшықтар бірнеше артықшылықтарға ие: төмен құны; жұқа және икемді; жоғары өткізу қабілеттілігі; сигналдың нашарлауы; сандық сигналдарды жібере алады; аз тұтанғыш; жеңіл салмақ. Бұл артықшылықтар оптикалық талшықтарды көптеген қолданбалар үшін, әсіресе телекоммуникациялар мен деректерді тасымалдауда таңдаулы таңдау жасайды [2].

Мыс сымдармен салыстырғанда талшықты-оптикалық кабельдер төмен қуатты таратқыштарды пайдаланады, өйткені сигналдар аз тозуға ұшырайды. Жіберілген сигналдар барлық талшықты-оптикалық кабельде өзінің бастапқы сапасы мен қарқындылығын сақтайды. Сонымен қатар, талшықты-оптикалық кабельдер электромагниттік кедергілерге және көрші сымдардан келетін айқаспаға төзімді.

Оптикалық талшықтар штамм, температура, қысым және т.б. сияқты әртүрлі параметрлерді өлшеу үшін сенсор ретінде қызмет ете алады. Олардың шағын өлшемдері мен қашықтағы жерлерде электр қуатынсыз жұмыс істеу мүмкіндігі белгілі бір қолданбаларда дәстүрлі электрлік сенсорларға қарағанда артықшылық береді. Мысалы, талшықты-оптикалық сенсорлар мұнай ұңғымаларында температура мен қысымды өлшеуге өте қолайлы. Мұнай ұңғымаларының өте жоғары температурасы бар қатал ортасы оларды жартылай өткізгіш датчиктер үшін жарамсыз етеді. Дегенмен, талшықты-оптикалық сенсорлар осындай жағдайларда тиімді жұмыс істей алады, бұл бөлінген температураны анықтауға мүмкіндік береді [3].

Сенсорлық қосымшалардан басқа, оптикалық талшықтар әртүрлі жарықтандыру құрылғыларында жарық өткізгіштер ретінде де қолданылады. Олар, әсіресе, жарықты көздің анық сызығынсыз белгілі бір нысанаға бағыттау қажет болған жағдайда пайдалы.

Медициналық және өнеркәсіптік қолданбаларды атап өтетін болсақ, оптикалық талшықтар медициналық процедураларда аз инвазивті операциялар мен эндоскопиялық зерттеулер кезінде жарықтандыру үшін жарқын жарық беру үшін қолданылады; өнеркәсіптік жағдайларда оптикалық талшықтар сутегі газының болуын анықтайтын сутегі микросенсорларында қолданылады.

Архитектуралық жарықтандыру саласындағы қолданылуына келетін болсақ, оптикалық талшықтар күн сәулесін төбелерден ғимараттардың басқа аймақтарына жіберу үшін пайдаланылады, ішкі кеңістіктерде табиғи жарықтандыруды қамтамасыз етеді; талшықты-оптикалық жарықтандыру сонымен қатар жарықтандырылған маңдайшалар, көркем дисплейлер және жасанды шыршалар сияқты сәндік мақсаттарда қолданылады.

Коммерциялық қолданбаларда пайдаланылуы бойынша айтатын болсақ, әшекей бутиктерінде оптикалық талшықтар кристалды дисплейлерді әртүрлі бұрыштардан жарықтандыру үшін пайдаланылады, бұл қызықты көрнекі әсер береді; талшықты-оптикалық жарықтандыру сонымен қатар бөлшек сауда дүкендерінің, мейрамханалардың және басқа да коммерциялық кеңістіктердің эстетикасын жақсарту үшін қолданылады.

Құрылысы бойынша оптикалық талшық LiTraCon мөлдір бетонында маңызды рөл атқарады, бұл бетон құрылымының ішінде жарықты өткізуге мүмкіндік береді. Оптикалық талшықтарды оптикалық жүйелерде кескіндерді қалыптастыру үшін пайдалануға болады. Ішкі кеңістіктерді визуализациялау үшін пайдаланылатын ұзын, жұқа құрылғылар болып табылатын эндоскоптар линзалары бар оптикалық талшықтардың когерентті байламдарын пайдаланады. Медициналық эндоскоптар аз инвазивті зерттеулер мен хирургиялық процедураларға көмектеседі, ал өндірістік эндоскоптар реактивті қозғалтқыштар сияқты жету қиын жерлерді тексеруге мүмкіндік береді.

Эрбий сияқты сирек жер элементтерімен легирленген оптикалық талшықтар лазерлік күшейту ортасы немесе оптикалық күшейткіш ретінде қызмет етеді. Қолданыстағы талшықты-оптикалық желіге легирленген талшықтың қысқа сегментін қосу арқылы сигналдарды күшейтуге болады. Қоспа талшық екінші лазер толқын

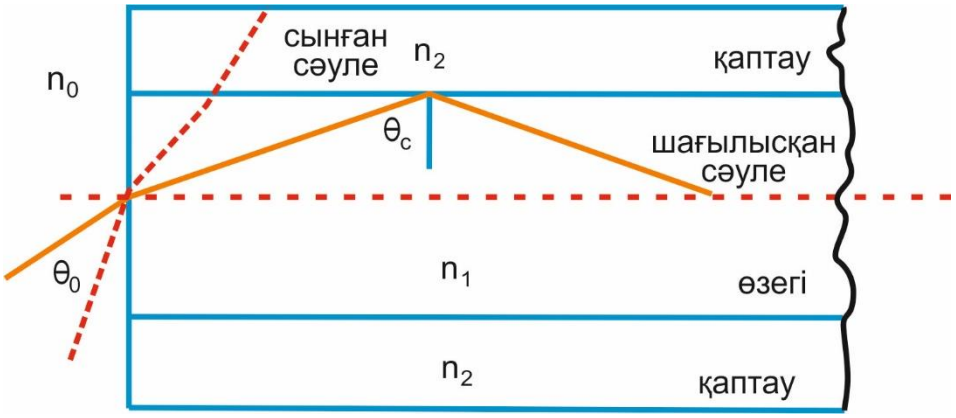
ұзындығымен айдалады, ол сигнал толқынымен әрекеттеседі және оның қуатын арттырады.

Күшейту механизмі бойынша оптикалық талшықты күшейткіштерде қосылатын талшық арқылы екі толқын ұзындығы жарық беріледі. Сорғы толқын ұзындығы сигнал толқынына қуат беріп, күшейтуге мүмкіндік береді. Күшейтуге жауапты негізгі процесс ынталандырылған эмиссия болып табылады.

Ғылыми қолданбалардағы ерекшелігіне толқын ұзындығы бойынша ауысатын легірленген оптикалық талшықтар сцинтилляциялық жарықты жинау үшін физикалық эксперименттерде қолданылуын атап өтсек болады.

Оптикалық талшықтарды қиын электрлік орталарда электронды құрылғыларға төмен қуат деңгейін (шамамен бір ватт) беру үшін пайдалануға болады. Бұған жоғары қуатты антенна элементтеріндегі электрмен жабдықтау және жоғары вольтты тарату жабдықтарында қолданылатын өлшеу құралдары кіреді.

Талшықты-оптикалық тензометрлер екі негізгі санатқа бөлінеді: қарқындылық метрикалық сенсорлар: оптикалық талшық арқылы өтетін жарық қарқындылығының өзгеруін өлшейді. Интерферометриялық сенсорлар: оптикалық талшық арқылы таралатын жарық фазасындағы өзгерістерді өлшейді. Шағын иілу сенсорлары: сыртқы күштердің әсерінен оптикалық талшықтың иілуінен туындаған қарқындылық өзгерістерін анықтайды. Fabry-Perot сенсорлары: оптикалық талшықпен тураланған екі айнаны пайдаланыңыз. Деформацияға байланысты айналар арасындағы қашықтықтың өзгеруі шағылысқан жарық фазасын өзгертеді. Брэгг торлары: толқын ұзындығына тән шағылысу жасау үшін талшықтың сыну көрсеткішіндегі мерзімді өзгерістерді пайдалануға болады. Деформация шағылған толқын ұзындығының ығысуын тудырады [4].



1 сурет - Талшықты-оптикалық сенсордың негізгі геометриясы

Bragg торлы сенсорлар Брэгг шағылыстыру принципін пайдаланатын талшықты-оптикалық сенсордың бір түрі болып табылады. Ол ұзындығы бойынша сыну көрсеткіші периодты түрде өзгеретін оптикалық талшықтың кесіндісінен тұрады. Бұл вариация Брэгг толқын ұзындығы деп аталатын белгілі бір толқын ұзындығында жарықты көрсететін торды жасайды.

Талшық бойлық деформацияға ұшыраған кезде (созылу немесе қысу) сыну көрсеткішіндегі периодтық тербелістердің арақашықтығы өзгереді. Торлы кезеңдегі бұл өзгеріс шағылған Брэгг толқын ұзындығының ығысуына әкеледі. Толқын ұзындығының ығысуын өлшеу арқылы деформацияның мөлшерін анықтауға болады.

Брэгг торлы сенсорының негізгі принципі 1-суретте көрсетілген. Жарық тордан өткен сайын ол әрбір сыну көрсеткішінің вариациясымен көрінеді. Шағылысқан толқындар бір-біріне кедергі жасайды, нәтижесінде Брэгг толқын ұзындығында

конструктивті кедергі және басқа толқын ұзындықтарында деструктивті кедергі пайда болады. Бұл оптикалық спектрде тар жолақты шағылысу шыңын жасайды.

Деформацияға байланысты талшық ұзындығының өзгеруі сыну көрсеткішінің вариациялары арасындағы қашықтықты өзгертіп, Брэгг толқын ұзындығының ығысуын тудырады. Толқын ұзындығының бұл ығысуын дәл өлшеуге және талшықтың деформациясын немесе деформациясын анықтау үшін пайдалануға болады.

Нәтижелер мен талқылау.

Құрылымдық бақылауға арналған талшықты-оптикалық сенсорлар: Соңғы жылдарда құрылымдардағы көптеген параметрлерді өлшеу үшін талшықты-оптикалық сенсорлардың көптеген конфигурациялары әзірленді. Бұл сенсорлар шағын өлшемдері, электромагниттік кедергілерге қарсы иммунитеті және үздіксіз бақылауды қамтамасыз ету қабілеті арқасында дәстүрлі сенсорларға қарағанда артықшылықтар ұсынады.

Оптикалық талшықтарды екі негізгі түрге бөлуге болады: бір режимді талшықтар және көп режимді талшықтар. Бір режимді талшықтар кернеу немесе күш сенсорлары сияқты оқшауланған немесе механикалық сенсорларда қолдануға жарамды. Көп режимді талшықтар бөлінген датчиктер, соның ішінде термиялық сенсорлар мен параметрлердің кең ауқымы үшін сенсорлар үшін өте қолайлы.

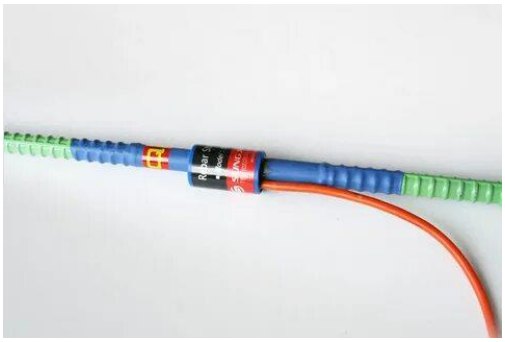
Талшықты-оптикалық сенсорлар әртүрлі параметрлерді бақылау үшін құрылымдарға ендірілген немесе бекітілген болуы мүмкін, соның ішінде: деформация, температура, ылғалдылық, діріл, коррозияны жатқызуға болады. Талшықты-оптикалық сенсорлардың артықшылықтарына шағын өлшем және икемділік құрылымдарға оңай біріктіруге мүмкіндік беруі, қатты орталарға және электромагниттік кедергілерге төзімділік, нақты уақытта, үздіксіз бақылауды қамтамасыз ету мүмкіндігі, бір талшықпен бірнеше параметрлерді бақылауға мүмкіндік беретін мультиплекстеу мүмкіндіктерін жатқызады [4].

Құрылымдық бақылауға арналған талшықты-оптикалық сенсорлар талшықты-оптикалық сенсорлар олардың әмбебаптығы мен көптеген параметрлерді өлшеу мүмкіндігіне байланысты құрылымдық мониторингте танымал болды. Бұл сенсорларды әртүрлі құрылымдарға, соның ішінде ғимараттарға, жолдарға, бөгеттерге, бетон немесе болат конструкцияларға салуға немесе бекітуге болады.

Оптикалық талшықтар екі негізгі түрге бөлінеді. Бір режимді талшықтарда кернеу немесе күш сенсорлары сияқты оқшауланған немесе механикалық сенсорлар үшін өте қолайлы болып келеді. Көп режимді талшықтар бөлінген сенсорларға, соның ішінде термиялық сенсорларға және параметрлердің кеңірек диапазонына арналған сенсорларға сәйкес келеді. Құрылымдық мониторингтегі қолданбаларға талшықты-оптикалық сенсорлар құрылымдардағы әртүрлі параметрлерді бақылай алады, соның ішінде: деформация және деформация, температура, ылғалдылық, діріл, коррозия. Талшықты-оптикалық сенсорлардың артықшылықтарына шағын өлшем және икемділік құрылымдарға оңай біріктіруге мүмкіндік беруі, қатты орталарға және электромагниттік кедергілерге төзімділік, нақты уақытта, үздіксіз бақылауды қамтамасыз ету мүмкіндігі, бір талшықпен бірнеше параметрлерді бақылауға мүмкіндік беретін мультиплекстеу мүмкіндіктері [5].

Нүктелік сенсорларды пайдалану арқылы ең жоғары кернеуді өлшеуде мынадай қиындықтар кездеседі: әртүрлі жүктемелер кезінде арқалықтардағы кернеулердің біркелкі бөлінбеуіне байланысты нүктелік датчиктердің көмегімен белгілі бір нүктедегі ең жоғары кернеуді анықтау қиын болуы мүмкін. Есептелген кернеу сенімділігінің дәлдігі негізінен осы сенсорлардың саны мен орналасуына байланысты. Құрылымдық қауіпсіздікті бағалауға арналған талшықты-оптикалық жүйелер нүктелік сенсорлардың шектеулерін еңсеру үшін құрылымдық элементтердің қауіпсіздігін бағалау үшін әртүрлі

механизмдерге негізделген әртүрлі талшықты-оптикалық жүйелер әзірленді. Осындай сенсорлардың бірі 2-суретте бейнеленген.

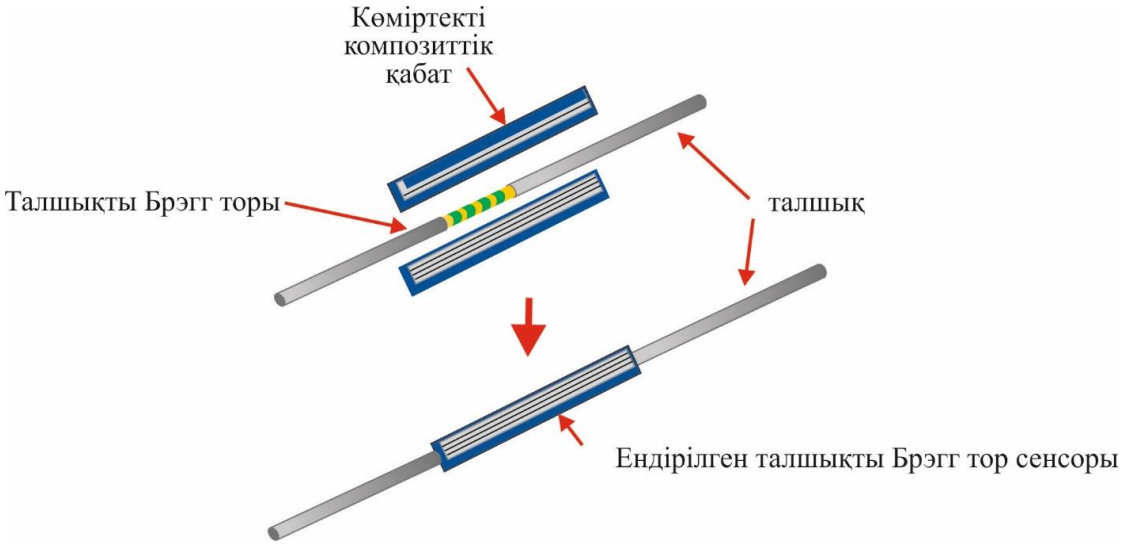


2 сурет - Кернеу сенсорының кескіні

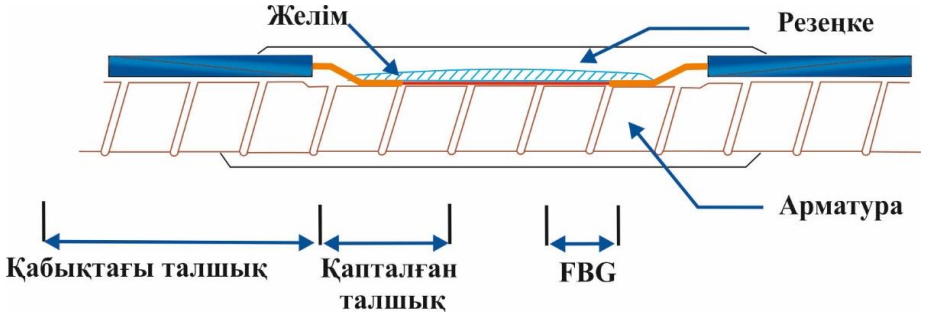
Талшықты-оптикалық сенсорларды қолдану арқылы деформацияны өлшеу үшін детрометрлер әдетте құрылымның екі нүктесі арасындағы салыстырмалы орын ауыстыруды өлшеу үшін қолданылады. Талшықты-оптикалық сенсорлар сыртқы факторлардың әсерінен оптикалық талшық бойындағы екі нүкте арасындағы қашықтықтың өзгеруін пайдалана отырып, балама тәсілді ұсынады.

Өлшенген деформация талшықтың ұзындығы бойынша орташа мәнді білдіретіндіктен, арқалық бойымен деформацияның таралуын бақылау үшін бірнеше талшықты-оптикалық сенсорларды пайдалануға болады. Осы сенсорлардан алынған деректерді талдау арқылы сәуледегі максималды деформация немесе кернеуді анықтауға болады. Бұл тәсіл бір нүктелік сенсорды пайдаланумен салыстырғанда құрылымдық мінез-құлықты неғұрлым толық түсінуді қамтамасыз етеді [6].

Деформация сенсорының дизайны және өнімділігіне тоқталайық. Деформация сенсорлары көміртекті композиттік материалдың қабаттары арасына талшықты Брэгг торын ендіру арқылы құрастырылады. Бұл датчиктер 3-суретте көрсетілгендей ұзындығы шамамен 50 мм және қалыңдығы 0,5 мм. Датчиктердің дәлдігі мен сезімталдығы сұрау үшін қолданылатын оптикалық жүйенің сипаттамаларына байланысты. 4-сурет оптикалық жүйедегі өзгерістер сенсордың жұмысына қалай әсер ететінін көрсететін осы қатынасты көрсетеді.



3 сурет - Штамм сенсорының интеграциясы



4 сурет - Деформация сенсорының схемалық көрінісі

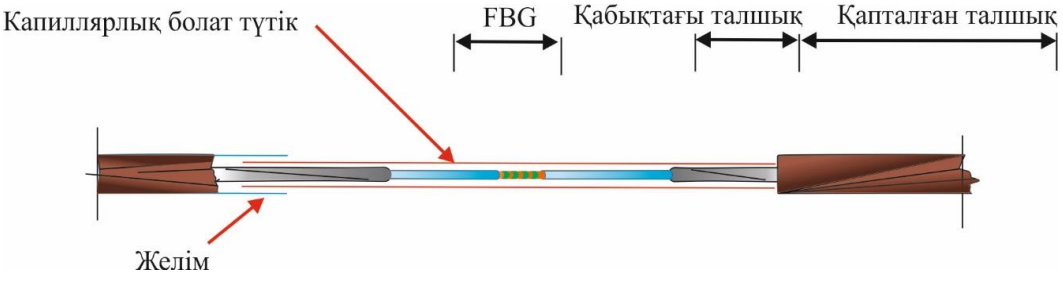
Температура сенсорларының қолданылу ортасы артып келеді. Температура сенсорлары әртүрлі құрылымдардың термиялық кеңеюін бақылауда, әсіресе қоршаған орта факторларына немесе жұмыс жағдайларына байланысты дифференциалды қыздыру орын алуы мүмкін жағдайларда шешуші рөл атқарады.

Қоршаған ортаның әсері бойынша тротуарлар мен көпірлердің палубаларын күнмен жылыту айтарлықтай термиялық кеңеюді тудыруы мүмкін, бұл дұрыс басқарылмаса, құрылымның бұзылуына әкелуі мүмкін. Термиялық кеңеюді бақылау және бақылау, олардың қауіпсіздігі мен тұтастығын қамтамасыз ету үшін осы құрылымдардың ішіне температура сенсорларын енгізуге болады.

Жұмыс шарттары бойынша ядролық реакторлар, қысымды ыдыстар және пештер сияқты маңызды инфрақұрылымдарда термиялық кеңеюдің қауіпсіз шектен асып кетуіне жол бермеу үшін температураны дәл бақылау өте маңызды. Температура сенсорлары осы құрылымдардың термиялық кеңеюі туралы нақты уақыттағы деректерді қамтамасыз етеді, бұл пайдалану қауіпсіздігін сақтау үшін белсенді шараларды қабылдауға мүмкіндік береді. Әртүрлі материалдар термиялық кеңеюдің әртүрлі коэффициенттерін көрсетеді. Температура сенсорлары нақты және сенімді өлшеулерді қамтамасыз ете отырып, нақты материал қасиеттеріне бейімделуі мүмкін. Бұл термиялық кеңею коэффициенті дәстүрлі материалдардан айтарлықтай өзгеруі мүмкін композициялық құрылымдар үшін өте маңызды [7].

Температура сенсоры 5-суретте көрсетілгендей, қорғаныс металл түтігінің ішінде орналасқан талшықты Брэгг торынан тұрады. Бұл дизайн екі негізгі артықшылықты ұсынады. Біріншісі, қоршаған ортаны қорғауда металл түтік FBG-ны ылғал, шаң және механикалық зақымдану сияқты сыртқы факторлардан қорғап, сенсордың қатал ортада сенімділігі мен ұзақ қызмет ету мерзімін қамтамасыз етеді. Екіншісі, жетілдірілген температураны анықтауда металл түтік сенсордың температураны анықтау диапазонын тиімді түрде кеңейтеді. FBG-ді металл түтікпен термиялық байланыстыру арқылы сенсор температураның өзгеруіне көбірек жауап береді, бұл кеңірек температура диапазонында дәл өлшеулерді жүргізуге мүмкіндік береді.

6-суретте металл түтікке орнатылған температура сенсорының көрнекі көрінісі берілген.

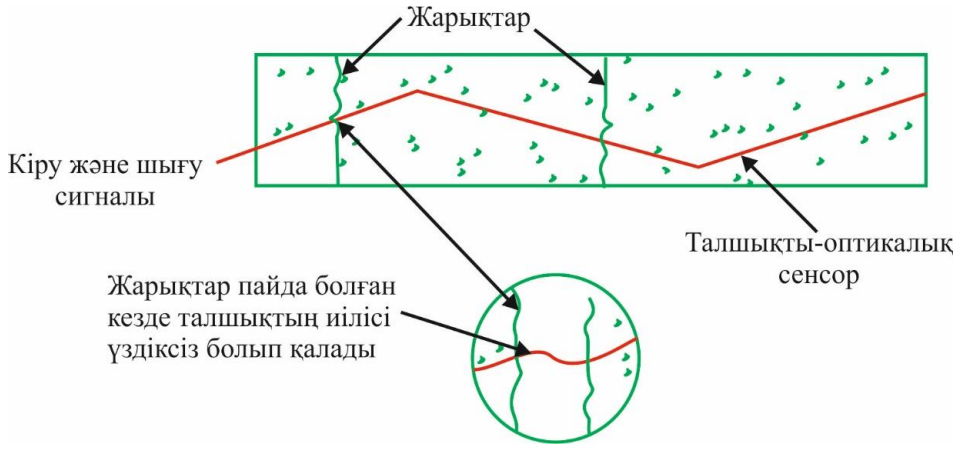


5 сурет - Температура датчигінің сұлбасы

6 сурет - Температура сенсорының кескіні

Жарықтардың мониторингі көпір төсемдері сияқты маңызды бетон құрылымдарының жағдайын бағалау үшін өте маңызды. Ені 0,15-0,2 мм-ден асатын жарықтар судың және хлорид ионының шамадан тыс енуін жеңілдетеді, бұл болат арматурасының коррозиясына әкеледі. Сонымен қатар, күшті жер сілкінісінен кейін жиі байқалатын миллиметрлік жарықшақтардың пайда болуы құрылымның айтарлықтай зақымдалуын білдіреді. Осы жарықшақтарды анықтау және бақылау арқылы инженерлер құрылымдық ықтимал мәселелерді белсенді түрде анықтап, уақытылы жөндеу шараларын жүзеге асыра алады [8].

Бетон конструкцияларындағы жарықшақты анықтаудың дәстүрлі әдістері көбінесе көп еңбекті қажет етеді, қымбат және сенімсіз. Осы шектеулерді шешу үшін зерттеушілер жарықтарды сенімді түрде анықтап, бақылай алатын талшықты-оптикалық сенсорларды әзірледі. Бұл сенсорлар бетон элементінің ішінде ирек сызбаға салынған 7-суретте көрсетілгендей оптикалық талшықтан тұрады. Жарықтар пайда болғанға дейін талшық бойымен жарық қарқындылығының таралуын өлшеу арқылы жарық қарқындылығының кез келген кейінгі өзгерістері жарықшақтардың пайда болуын көрсете алады. Құрылымда жарықшақ ашылғанда, талшық иіліп, үздіксіз болады, бұл жарық қарқындылығының үлгісінің өзгеруіне әкеледі. Бұл өзгерістерді дәл өлшеуге және талдауға болады, бұл жарықтардың орналасуы мен ауырлығы туралы нақты ақпарат береді.



7 сурет - Зигзаг-сенсорының жұмысы

Талшықты-оптикалық зондтау технологияларындағы жетістіктер олардың қолданбаларын зертханалық параметрлерден нақты әлем сценарийлеріне дейін кеңейтті. Атап айтқанда, талшықты-оптикалық сенсорлардың кейбір түрлері шыны талшықтар мен кабельдік құрылымдардың денсаулығы мен тұтастығын бақылауда тиімді екенін дәлелдеді. Бұл сенсорлар деформация, температура және діріл сияқты әртүрлі параметрлерді анықтау және өлшеу үшін талшықты оптиканың бірегей қасиеттерін

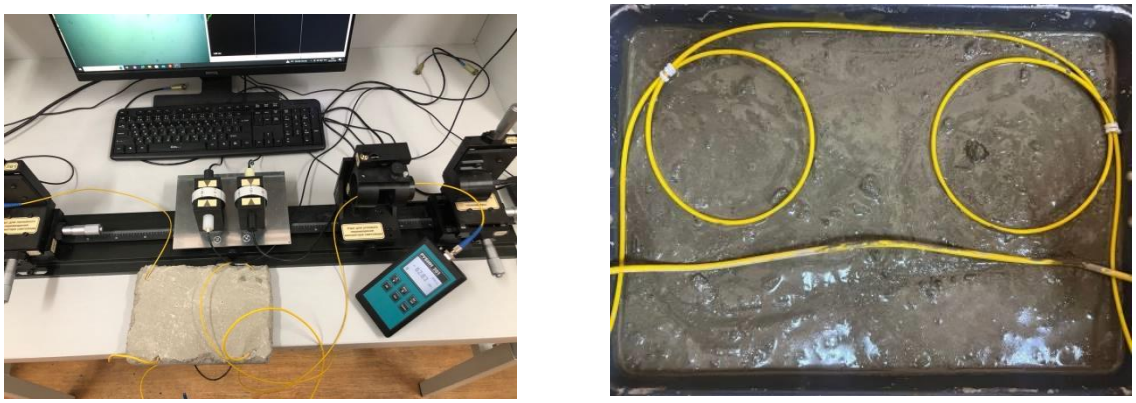
пайдаланады. Конструкцияларға талшықты-оптикалық сенсорларды енгізу немесе бекіту арқылы инженерлер олардың жағдайын үздіксіз бақылап, кез келген ықтимал мәселелерді немесе зақымдануды анықтай алады. Бұл бақылау мүмкіндігі құрылымның тозуын ерте анықтау қауіпсіздік пен техникалық қызмет көрсетуді жоспарлау үшін маңызды болып табылатын көпірлер, электр желілері және жел турбиналары қалақтары сияқты маңызды инфрақұрылым үшін әсіресе құнды. Талшықты-оптикалық сенсорлар осы құрылымдардың ұзақ мерзімді тұтастығы мен өнімділігін қамтамасыз ету үшін үнемді және сенімді шешімді ұсынады [9].

Талшықты-оптикалық сенсорлар әртүрлі құрылымдық элементтердің денсаулығы мен тұтастығын бақылаудың жан-жақты құралы ретінде пайда болды, соның ішінде: талшықты-оптикалық сенсорлар: кернеу, температура және діріл сияқты әртүрлі параметрлерді бақылау. Талшықты күшейтілген полимер (FRP): FRP құрылымдарындағы жарықтар мен зақымдарды анықтаңыз.

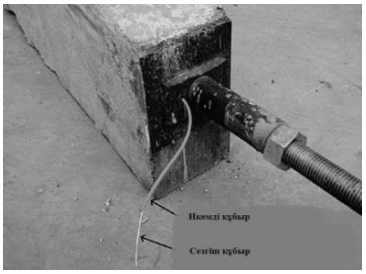
Кернеуден кейінгі кабельдер керілген конструкциялардағы кабельдердің тартылуын және ұзаруын бақылауда. Бұл сенсорлар көпірлердің, ғимараттардың және басқа маңызды инфрақұрылымдардың құрылымдық әрекеті туралы құнды түсініктер бере алады. Штаммды және басқа параметрлерді үздіксіз бақылай отырып, инженерлер ықтимал мәселелерді немесе зақымдануды ерте кезеңде анықтай алады, бұл дер кезінде араласуға және алдын ала техникалық қызмет көрсетуге мүмкіндік береді.

Құрылымдық бақылау мүмкіндіктерінен басқа, талшықты-оптикалық сенсорларды бос кеңістіктегі деформация мен температураны өлшеу үшін де пайдалануға болады. Бұл әмбебаптық оларды қолданудың кең ауқымы үшін қолайлы етеді, соның ішінде: жел туннельдеріндегі заттардың пішіні мен қозғалысын бақылау, күрделі ортада температураның таралуын өлшеу, діріл мен шу көздерін анықтау және табу.

Тұтастай алғанда, талшықты-оптикалық сенсорлар маңызды инфрақұрылымның қауіпсіздігі мен тұтастығын қамтамасыз ету үшін құнды ақпаратты қамтамасыз ететін құрылымдық денсаулықты бақылау үшін қуатты және жан-жақты шешім ұсынады.



8 сурет - Сынақ қондырғысының фотосуреті



9 сурет - Шыны пластик кабельмен нығайтылған арқалықтың фотосуреті [5]

10 сурет - Құрамында оптикалық талшық бар бетон конструкциясының фотосуреті

Көпір мен ылғалдылықты бақылауда талшықты-оптикалық сенсорларды қолдану саласында көпір мониторингі қарастырылады. Талшықты-оптикалық сенсорлар қысқа мерзімді және ұзақ мерзімді құрылымдық бағалау үшін құнды деректерді қамтамасыз ететін көпірді бақылау үшін кеңінен қолданылады. Бұл сенсорлар әртүрлі параметрлерді өлшей алады, соның ішінде: деформация, температура, діріл, ауыстыру. Бұл параметрлерді үздіксіз бақылай отырып, инженерлер ықтимал мәселелерді немесе зақымдануды ерте кезеңде анықтай алады, бұл дер кезінде араласуға және алдын ала техникалық қызмет көрсетуге мүмкіндік береді. Талшықты-оптикалық сенсорлар бүкіл әлем бойынша көпірлерде сәтті қолданылып, осы маңызды құрылымдардың қауіпсіздігі мен ұзақ өмір сүруіне ықпал етті [10].

Талшықты-оптикалық сенсорлар бетон конструкцияларындағы ылғалдылық деңгейін бақылауда да тиімді екенін дәлелдеді. Ішкі коррозия көрінетін сыртқы белгілерсіз пайда болуы мүмкін және көбінесе су мен еріген тұздардың түсуінен болады. Брагг талшықты торларына (FBGs) негізделген талшықты-оптикалық ылғал сенсорлары бетондағы ылғал мөлшерінің өзгеруін анықтай алады. Бұл сенсорлар ылғалға сезімтал полимермен қапталған FBG көмегімен жасалған. Ылғалды сіңірген кезде полимер ісініп, FBG толқын ұзындығының ығысуын тудырады. Толқын ұзындығының осы ауысуын бақылай отырып, инженерлер ылғалдылықты анықтай алады және ықтимал коррозия қаупі бар аймақтарды анықтай алады. Талшықты-оптикалық ылғал сенсорлары бетон конструкцияларындағы ылғалдылықты бақылаудың сенімді және интрузивті емес әдісін ұсынады, олардың тұтастығы мен ұзақ қызмет ету мерзімін қамтамасыз етуге көмектеседі [11].

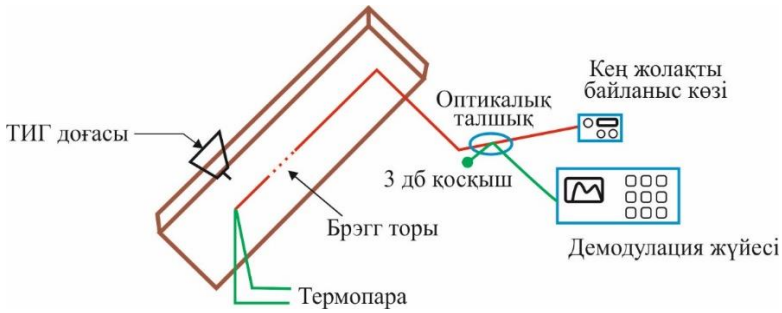
11 сурет - Эксперимент жүргізу барысы

Талшықты-оптикалық сенсорлар ықшам өлшемдері мен электромагниттік кедергілерге төзімділігіне байланысты дәнекерлеу кезінде қалдық кернеуді бақылау үшін ерекше қолайлы. Олардың жоғары тұрақтылығы мен мультиплекстеу мүмкіндіктері осы талапты қолданбада олардың пайдалылығын одан әрі арттырады. Талшықты-оптикалық түрлендіргіштер әртүрлі құрылымдарда дәнекерлеу кезінде айнымалы және қалдық кернеулерді анықтау үшін сәтті қолданылды. Жалпы тестілеу схемасы 12-суретте көрсетілген.

Талшықты-оптикалық сенсорлар дәнекерлеу аймағына жақын дайындамаға ендірілген немесе бекітілген. Дәнекерлеу кезінде датчиктер дәнекерлеу процесіне байланысты деформацияны немесе температураның өзгеруін өлшейді.

Содан кейін бұл деректер дәнекерленген құрылымдағы кернеулердің таралуы мен эволюциясы туралы түсінік беру үшін талданады [12].

Қалдық кернеуді бақылай отырып, инженерлер дәнекерлеу параметрлерін оңтайландырып, шамадан тыс кернеуден туындаған құрылымдық бұзылулар қаупін азайта алады. Талшықты-оптикалық сенсорлар дәнекерленген құрылымдардың тұтастығы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін қуатты және әмбебап құралды ұсынады.



12 сурет - Тесттердің жалпы орналасуы

Талшықты-оптикалық сенсорды пайдалана отырып, біз дәнекерленген материалдағы өтпелі және қалдық деформацияларды сәтті өлшедік. Бұл сенсор мен металл пластина арасындағы тамаша байланыс жағдайында қол жеткізілді. Өтпелі деформациялар дәнекерлеу процесінде пайда болатын деформациялар, себебі материал қыздыру және салқындату әсерінен кеңейіп, жиырылады. Қалдық деформациялар ішкі кернеулердің қайта бөлінуіне байланысты дәнекерлеу аяқталғаннан кейін материалда қалатын деформациялар. Осы деформацияларды дәл өлшеу арқылы біз дәнекерлеу процесі мен дәнекерленген материалдың әрекеті туралы құнды түсініктерге қол жеткізе аламыз. Бұл ақпаратты дәнекерлеу параметрлерін оңтайландыру және дәнекерленген құрылымдардың сапасы мен қауіпсіздігін жақсарту үшін пайдалануға болады.

Қорытынды.

Талшықты-оптикалық сенсорлар құрылымдық тұтастықты және көптеген параметрлерді тиімді өлшейді. Олар ұзартылған жүктемелер кезінде құрылымдарды инвазивті емес бақылауда, ықтимал бұзылулар туралы ертерек ескертулерді қамтамасыз етеді. Атап айтқанда, талшықты-оптикалық сенсорлар әртүрлі конструкцияларда деформацияны, кернеуді және температураны өлшеуде ерекше дәлдік пен дәлдікті көрсетеді. Олардың икемділігі мен бейімделгіштігі оларды әртүрлі бағытта орнатуға мүмкіндік береді. Олардың мүмкіндіктерін одан әрі жетілдіру үшін кешенді зертханалық және далалық сынақтар ұсынылады.

Талшықты-оптикалық сенсорлар қалалық инфрақұрылымды, әсіресе ғимараттарда төңкеріс жасайды. Бұл сенсорлар температура, кернеу және діріл сияқты өмірлік маңызды

параметрлерді бақылап, болжамды техникалық қызмет көрсету және тәуекелдердің алдын алу үшін құнды деректер береді. Талшықты-оптикалық сенсорларды «ақылды қалалар» бастамаларына біріктіру арқылы қала шенеуніктері мен басшылары ғимараттың тиімділігін оңтайландырып, тоқтап тұру уақытын азайтып, тұрғындардың қауіпсіздігін арттыра алады. Бұл инновациялық технология мүдделі тараптарға негізделген шешімдер қабылдау және қала тұрғындарының әл-ауқатын қамтамасыз ету үшін нақты уақыттағы деректермен мүмкіндік береді.

Зерттеу масштабтауға, үнемділікке және қолданыстағы құрылыс инфрақұрылымымен үздіксіз интеграцияға басымдық бере отырып, талшықты-оптикалық зондтау технологияларындағы үздіксіз инновацияның маңыздылығын атап көрсетеді. Салалық сарапшылар мен мемлекеттік органдар арасындағы ынтымақтастық инновацияларды дамыту және қалалық ғимараттарда талшықты-оптикалық сенсорларды қабылдауды жеделдету үшін өте маңызды.

Бұл зерттеу қауіпсіз, тұрақты және тұрақты қалалық ортаны дамытуға ықпал етеді. Бұл технологиялардың әлеуетін пайдалану болашақ қалаларды қалыптастыру үшін өте маңызды.

Қаржыландыру. 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 жобаларымен қаржыландырылған.

ӘДЕБИЕТТЕР

[1] M. F. Bado and J. R. Casas. “Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring,” Sensors, 2021, vol. 21, 1818, https://doi.org/10.3390/s21051818

[2] NK Smailov, S Zh Koshkinbayev, AM Bazarbay, AA Abdykadyrov, AO Kabdoldina, M Zh Koshkinbaeva. Исследование методов преобразования силовых и тепловых параметров для совмещенных датчиков давления и температуры Engineering Journal of Satbayev University, 2021. https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.v143.i1.30

[3] Mikhailov, P., Ualiyev, Z. (2020). Sensor stability assurance problems and their relationship with the overall problems of providing system performance quality. MATEC Web of Conferences, 329, 03032. doi: https://doi.org/10.1051/matecconf/202032903032

[4] Sun OBE, T. et al. (2019). Optical Fiber Sensors for Remote Condition Monitoring of Industrial Structures. In: Peng, GD. (eds) Handbook of Optical Fibers. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7087-7_19

[5] M. Mahdikhani, Z. Bayati. Application and development of fiber optic sensors in civil engineering. Conference: The 14 th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.

https://www.researchgate.net/publication/344455443_APPLICATION_AND_DEVELOPMENT_OF_FIBER_OPTIC_SENSORS_IN_CIVIL_ENGINEERING

[6] Murashkina, T. I., Motin, A. V., Chukareva, M. M., Torgashin, S. I. (2018). Technology of fabrication of sensitive element of the differential fiber-optic acceleration sensor. Measuring. Monitoring. Management. Control, 1 (23), 38–44. doi: http://doi.org/10.21685/2307-5538-2018-1-6

[7] Assem Kabdoldina, Zhomart Ualiyev, Nurzhigit Smailov, Feruza Malikova, Kuralay Oralkanova, Murat Baktybayev, Dinara Arinov, Askar Khikmetov, Aktoty Shaikulova, Lashin Bazarb. DEVELOPMENT OF THE DESIGN AND TECHNOLOGY FOR

MANUFACTURING A COMBINED FIBER-OPTIC SENSOR USED FOR EXTREME OPERATING CONDITIONS. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266359

[8] A.Furtado. Assessment and Retrofitting of Building Structures: Experimental Testing and Modelling—Editorial. Appl. Sci. 2023, 13(1), 486; https://doi.org/10.3390/app13010486

[9] D. Kiesewetter, S. Krivosheev, S.Magazinov, V. Malyugin, S. Koshkinbayev, N.Smailov. Measurement of High-Speed Deformations Using Fiber Bragg Gratings. International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), 2022 10.1109/EExPolytech56308.2022.9950795

[10] D. Kiesewetter, S. Krivosheev, S. Magazinov, V. Malyugin, N.Smailov, S. Koshkinbayev. Application of Fiber Bragg Gratings for Measuring the Crack Opening Rate. International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), 2023. https://doi.org/10.1109/EExPolytech58658.2023.10318546

[11] D. Kiesewetter, S. Krivosheev, S. Magazinov, V.Malyugin, S.Varzhel, E. Loseva, S.Koshkinbayev, N.Smailov. Application of Fiber Bragg Gratings as a Sensor of Pulsed Mechanical Action Sensors 2022, 22(19), 7289; doi: https://doi.org/10.3390/s22197289

[12] Shadab, A.; Raghuwanshi, S.K.; Kumar, S. Advances in Micro-Fabricated Fiber Bragg Grating for Detection of Physical, Chemical, and Biological Parameters—A Review. IEEE Sensors Journal 22(16):1-1. DOI:10.1109/JSEN.2022.3188813

REFERENCES*

[1] M. F. Bado and J. R. Casas. “Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring,” Sensors, 2021, vol. 21, 1818, https://doi.org/10.3390/s21051818

[2] NK Smailov, S Zh Koshkinbayev, AM Bazarbay, AA Abdykadyrov, AO Kabdoldina, M Zh Koshkinbaeva. Issledovanie metodov preobrazovanija silovyh i teplovyh parametrov dlja sovmeshhennyh datchikov davlenija i temperatury Engineering Journal of Satbayev University, 2021. https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.v143.i1.30

[3] Mikhailov, P., Ualiyev, Z. (2020). Sensor stability assurance problems and their relationship with the overall problems of providing system performance quality. MATEC Web of Conferences, 329, 03032. doi: https://doi.org/10.1051/matecconf/202032903032

[4] Sun OBE, T. et al. (2019). Optical Fiber Sensors for Remote Condition Monitoring of Industrial Structures. In: Peng, GD. (eds) Handbook of Optical Fibers. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7087-7_19

[5] M. Mahdikhani, Z. Bayati. Application and development of fiber optic sensors in civil engineering. Conference: The 14 th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.

https://www.researchgate.net/publication/344455443_APPLICATION_AND_DEVELOPMENT_OF_FIBER_OPTIC_SENSORS_IN_CIVIL_ENGINEERING

[6] Murashkina, T. I., Motin, A. V., Chukareva, M. M., Torgashin, S. I. (2018). Technology of fabrication of sensitive element of the differential fiber-optic acceleration sensor. Measuring. Monitoring. Management. Control, 1 (23), 38–44. doi: http://doi.org/10.21685/2307-5538-2018-1-6

[7] Assem Kabdoldina, Zhomart Ualiyev, Nurzhigit Smailov, Feruza Malikova, Kuralay Oralkanova, Murat Baktybayev, Dinara Arinov, Askar Khikmetov, Aktoty Shaikulova, Lashin Bazarb. DEVELOPMENT OF THE DESIGN AND TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING A COMBINED FIBER-OPTIC SENSOR USED FOR EXTREME OPERATING CONDITIONS. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266359

[8] A.Furtado. Assessment and Retrofitting of Building Structures: Experimental Testing and Modelling—Editorial. Appl. Sci. 2023, 13(1), 486; https://doi.org/10.3390/app13010486

[9] D. Kiesewetter, S. Krivosheev, S.Magazinov, V. Malyugin, S. Koshkinbayev, N.Smailov. Measurement of High-Speed Deformations Using Fiber Bragg Gratings. International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), 2022 10.1109/EExPolytech56308.2022.9950795

[10] D. Kiesewetter, S. Krivosheev, S. Magazinov, V. Malyugin, N.Smailov, S. Koshkinbayev. Application of Fiber Bragg Gratings for Measuring the Crack Opening Rate. International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), 2023. https://doi.org/10.1109/EExPolytech58658.2023.10318546

[11] D. Kiesewetter, S. Krivosheev, S. Magazinov, V.Malyugin, S.Varzhel, E. Loseva, S.Koshkinbayev, N.Smailov. Application of Fiber Bragg Gratings as a Sensor of Pulsed Mechanical Action Sensors 2022, 22(19), 7289; doi: https://doi.org/10.3390/s22197289

[12] Shadab, A.; Raghuwanshi, S.K.; Kumar, S. Advances in Micro-Fabricated Fiber Bragg Grating for Detection of Physical, Chemical, and Biological Parameters—A Review. IEEE Sensors Journal 22(16):1-1. DOI:10.1109/JSEN.2022.3188813

Nurzhigit Smailov, PhD, professor Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, n.smailov@satbayev.university

Ainur Kuttybayeva, candidate of economic sciences, associate professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, a.kuttybayeva@satbayev.university

Akmaral Tolemanova, doctoral student, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, tolemanova@gmail.com

Qydyrali Yssyrail, master student Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, kidir200091@gmail.com

Beibarys Sekenov, engineer, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, b.sekenov@satbayev.university

RESEARCH AND MODELING OF FIBER OPTIC SENSORS IN CITY BUILDINGS

Abstract. In recent years, fiber-optic sensors have been successfully used for structural control. Mainly due to their small size they can be widely used in structural elements. Moreover, advances in optical fiber manufacturing have enabled the development of innovative sensor systems for monitoring the condition of civil structures. An overview of our research in the development of structural fiber optic sensors is presented. It is shown that fiber optic sensors exhibit high sensitivity and accuracy in measuring strain, stress, and temperature in some structures. In this study, several examples are presented in which strain, stress and temperature were determined for structural elements.

Keywords. Fiber optic sensors, smart structures, monitoring, stress, strain, temperature.

Нуржигит Смайлов, PhD, профессор, Satbayev University, Алматы, Казахстан, n.smailov@satbayev.university

Айнур Куттыбаева, к.э.н.,, ассоциированный профессор Satbayev University, Алматы, Казахстан, a.kuttybayeva@satbayev.university

Акмарал Толеманова, докторант Satbayev University, Алматы, Казахстан, tolemanova@gmail.com

Қыдырәлі Ысырайыл, магистрант, Satbayev University, Алматы, Казахстан, kidir200091@gmail.com
Бейбарыс Секенов, инженер, Satbayev University, Алматы, Казахстан, b.sekenov@satbayev.university

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ В ЗДАНИЯХ ГОРОДА

Аннотация. В последние годы волоконно-оптические датчики успешно применяются для контроля конструкций. В основном благодаря своим небольшим размерам они могут широко использоваться в элементах конструкций. Более того, прогресс в производстве оптических волокон позволил разработать инновационные сенсорные системы для мониторинга состояния гражданских сооружений. Представлен обзор наших исследований в области разработки структурных волоконно-оптических датчиков. Показано, что волоконно-оптические датчики демонстрируют высокую чувствительность и точность при измерении деформации, напряжения и температуры в некоторых конструкциях. В этом исследовании приведено несколько примеров, в которых деформация, напряжение и температура были определены для структурных элементов.

Ключевые слова. Волоконно-оптические датчики, интеллектуальные структуры, мониторинг, напряжение, деформация, температура.

****

Келіп түсті: 19 наурыз 2024 ж.; қабылданды: 30 мамыр 2024 ж.