

[10] Lin, C.C.; Ju, M.S.; Chen, S.M.; Pan, B.W. A specialized robot for ankle rehabilitation and evaluation. *J. Med. Biol. Eng.* 2008, 28, 79–86.

[11] Nurahmi, L.; Caro, S.; Solichin, M. A novel ankle rehabilitation device based on a reconfigurable 3-RPS parallel manipulator. *Mech. Mach. Theory* 2019, 134, 135–150.

[12] Ceccarelli, M.; Ferrara, L.; Petuya, V. Design of a Cable-Driven Device for Elbow Rehabilitation and Exercise. In *Interdisciplinary Applications of Kinematics*; Springer: Cham, Switzerland, 2019, pp. 61–68.

[13] Pott, A.; Bruckmann, T. (Eds.) *Cable-Driven Parallel Robots: Proceedings of the 4th International Conference on Cable-Driven Parallel Robots*; Springer: Cham, Switzerland, 2019.

[14] Shahrol, M.N.; Basah, S.N.; Basaruddin, K.S.; Ahmad, W.K.W.; Ahmad, S.A. Modelling of a Cable-driven Ankle Rehabilitation Robot. *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.* 2018, 10, 53–59.

[15] Russo, M.; Ceccarelli, M. A wearable device for ankle motion assistance. In *Advances in Italian Mechanism Science: Mechanisms and Machine Science 91*; Springer: Cham, Switzerland, 2020, in print.

УДК 621.3

Г.Б. Кашаганова^а, К.О. Тогжанова^б, Г.Ж. Қабидоллиева^с, Д.А. Оразбаева^д

Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан

^аguljan_k70@mail.ru, ^бk.togzhanova@alt.edu.kz, ^сkabidolliyevaa06@gmail.com,

^дdinara_o.a@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Аннотация. Статья посвящена исследованию применения волоконно-оптических датчиков на основе волоконной решетки Брэгга для мониторинга дорожных покрытий. Волоконно-оптические датчики на основе волоконной решетки Брэгга являются наиболее перспективными инструментом для эффективного и долгосрочного мониторинга дорожных покрытий в различных условиях и пользуются большим спросом для прогнозирования механических свойств и возникновения повреждений дорожных покрытий.

Ключевые слова: мониторинг, дорожное покрытие, волоконно-оптические датчики, волоконные решетки Брэгга.

Аннотация. Мақала жол жабынын бақылау үшін талшықты Брэгг торына негізделген талшықты-оптикалық сенсорларды қолдануды зерттеуге арналған. Талшықты Брэгг торына негізделген талшықты-оптикалық сенсорлар әртүрлі жағдайларда жол жабындарын тиімді және ұзақ мерзімді бақылаудың ең алдыңғы қатарлы құралы болып табылады. Талшықты-оптикалық сенсорлар механикалық қасиеттері мен жол жабынының зақымдануын болжау үшін үлкен сұранысқа ие.

Түйінді сөздер: мониторинг, жол жабыны, талшықты-оптикалық сенсорлар, талшықты Брэгг торы.

Abstract. The article is devoted to the study of the use of fiber-optic sensors based on the fiber Bragg grid for monitoring road surfaces. Fiber-optic sensors based on the fiber Bragg grid are the most promising tool for effective and long-term monitoring of road surfaces in various conditions and are in great demand for predicting mechanical properties and the occurrence of damage to road surfaces.

Keywords: monitoring, road surface, fiber-optic sensors, fiber Bragg gratings.

Введение. Развитие волоконно-оптических технологий и их внедрение в различные отрасли промышленности, науки и техники открывают широкие перспективы для их применения. А именно применение оптических волокон в информационно-измерительных системах приобрело новый уровень развития. К информационно-измерительным системам предъявляются новые требования, такие как точностные характеристики, возможность стабильной работы при длительной эксплуатации, помехозащищенность и защита от внешних воздействий и агрессивных сред.

На данный момент альтернативой электронным измерительным системам является использование волоконно-оптических измерительных систем, в которых измеряемый параметр преобразуется в оптический сигнал, передаваемый по оптическому волокну. Преимущества оптического волокна позволяют использовать их в качестве чувствительных элементов в информационно-измерительных системах для измерения физических, химических и других величин, а также для мониторинга технического состояния важных, опасных производственных объектов и дорожных инфраструктур с целью предотвращения чрезвычайных ситуаций, приводящих к повреждению или разрушению объектов.

Мониторинг технического состояния строительных конструкций и дорожных инфраструктур обеспечивает их безопасную эксплуатацию. В ходе мониторинга отслеживаются процессы, происходящие в конструкциях объектов и в почве. Мониторинг проводится для своевременного выявления на ранней стадии тенденций негативных изменений состояния конструкций и дорожных покрытия, которые могут привести к переходу объекта в состояние ограниченной эксплуатации или чрезвычайной ситуации, а также получения необходимых данных для разработки мер по устранению возникших негативных процессов [1].

В данной статье мы рассмотрим очень важный вопрос, связанный с мониторингом дорожных покрытий.

Волоконно-оптические датчики дорожного покрытия.

Проектирование дорожного покрытия – это долгосрочный процесс оценки, необходимый для обеспечения эффективного распределения транспортных нагрузок на всех уровнях общей дорожной структуры.

Проектирование дорожного покрытия в основном является процессом долгосрочной оценки проекта, который обычно необходим для обеспечения эффективного распределения транспортных нагрузок на всех уровнях общей дорожной структуры. Общая структура дороги состоит из верхнего слоя, одного или нескольких базовых слоев, основания и дорожного полотна. Напряжения и деформации, возникающие на этих уровнях, должны находиться в пределах возможностей используемых материалов. Целью проектирования дорожного покрытия является создание инженерной конструкции, которая эффективно распределяет транспортные нагрузки в пределах выбранных параметров нагрузки, минимизируя их стоимость в течение срока службы дорожного покрытия.

В течение длительного времени дорожное покрытие, под воздействием окружающей среды, нагрузки, температуры, воды и ультрафиолетового излучения ухудшается. И многие сооружения, построенные десятки лет назад, нуждаются в укреплении, восстановлении и замене, а мониторинг состояния дорожного покрытия стал диагностическим инструментом для точного и эффективного контроля за поведением дорог.

В целях обеспечения общественной безопасности и обеспечения долгосрочной дорожной инфраструктуры необходимо проводить исследования и разрабатывать приложения для мониторинга структурного состояния дорог.

Для мониторинга дорожного покрытия необходимо получить полный анализ не только сверху, но предпочтительно изнутри дорожного покрытия. Для определения

реалистичных механических свойств дорожных покрытий, определение напряжений в нижней части асфальтобетонных дорожных покрытий с помощью неразрушающих испытаний представляет большой интерес.

Рассмотрев все методы и средства систем мониторинга, можно сказать, что наиболее перспективным подходом является использование волоконно-оптических датчиков (ВОД).

Волоконно-оптические датчики являются эффективным инструментом, применяемым в гражданских, механических и аэрокосмических инженерных сообществах для контроля и мониторинга различных структур. Предлагая многочисленные преимущества, такие как многофункциональность, надежность, простота интеграции, легкий вес, небольшие размеры, пассивный характер, устойчивость к электромагнитным помехам и коррозионная стойкость, [2-3] сравнивается с обычными электронными датчиками. Однако существует лишь несколько ограничений, такие как хрупкость простых датчиков, высокая стоимость и эффективность механизмов преобразования, а также сложность систем опроса. Эти оптические датчики могут быть интегрированы в дороги общего пользования для непрерывного мониторинга.

Волоконно-оптические датчики, используемые для измерения дорожного покрытия, должны быть совместимы с гетерогенными природными и механическими свойствами материалов дорожного покрытия. Во-первых, датчики должны быть как можно меньше, чтобы они не были слишком навязчивыми в битумных слоях. Во-вторых, для измерения деформации жесткость датчиков должна соответствовать жесткости асфальтобетонной смеси, чтобы правильно измерить механические свойства дорожного покрытия. Более того, встроенные датчики должны выдерживать самые высокие нагрузки, возникающие в процессе строительства дорожного покрытия (высокая температура и сжатие). После этого, если будет проведен долгосрочный мониторинг, эти датчики должны быть устойчивы к коррозии и к термо-механическим условиям [2].

Для измерения дорожного покрытия, особое место занимает именно волоконно-оптические датчики на основе волоконных решеток Брэгга (ВРБ).

ВРБ – это небольшая часть оптических волокон длиной в несколько миллиметров, в которых дифракционная решетка записывается ультрафиолетовым воздействием. Оптическое свойство этой решетки отражает оптическую полосу спектра инцидентов. ВРБ обладает врожденными качествами, которые могут быть очень чувствительными к термическим и механическим воздействиям. Длина волны Брэгга пропорциональна изменению температуры и/или деформации.

Принцип действия волоконной Брэгговской решетки. ВРБ изготавливаются путем бокового воздействия на сердцевину одномодового волокна периодическим интенсивным ультрафиолетовым излучением. Экспозиция приводит к постоянному увеличению показателя преломления сердцевины волокна, создавая модуляцию с фиксированным индексом, называемую решеткой в соответствии с рисунком экспозиции [5]. При каждом периодическом изменении преломления отражается небольшое количество света. Все отраженные световые сигналы когерентно объединяются в одно большое отражение на определенной длине волны, когда период решетки составляет примерно половину длины волны входного света [5]. Называемая условием Брэгга, длина волны, при которой происходит это отражение, называется длиной волны Брэгга. Световые сигналы на длинах волн, отличных от длины волны Брэгга, которые не согласованы по фазе, по существу прозрачны [5], как показано на рисунке 1. Поэтому свет распространяется через решетку с незначительным ослаблением или изменением сигнала. Только те длины волн, которые удовлетворяют условию Брэгга, подвергаются воздействию и сильно отражаются назад. На рисунке 1 показан типичный выходной отраженный спектр ВРБ [5,6]. Центральная длина волны отраженной составляющей удовлетворяет условию Брэгга:

$$\lambda_B = 2\Lambda n \quad (1)$$

где n - показатель преломления, а Λ - периодичность решетки.

Из-за зависимости параметров n и Λ от температуры и деформации длина волны отраженной составляющей будет изменяться в зависимости от температуры и деформации. Общее выражение зависимости деформации от температуры для тензодатчика ВРБ может быть описано в [7]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - P_\varepsilon)\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

где λ , ξ , α , P_ε и T - длина волны, коэффициент теплооптики, коэффициент теплового расширения, коэффициент оптической упругости и температура соответственно.

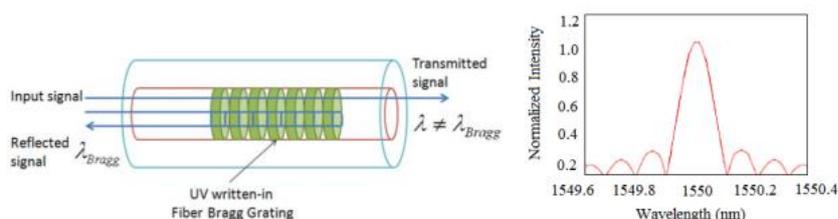


Рисунок 1 – Принцип работы ВРБ

Дорожное покрытие, как асфальт является наиболее широко используемых поверхностных материалов в дорожно-строительной промышленности. Асфальт является более простым материалом и можно более эффективно использовать для установки ВОД. Установив ВОД в асфальтное покрытие, можно проводить эксперименты, путем оценки влияния дорожного движения в реальном времени на измеренную деформацию и температуру, когда различные типы транспортных средств проезжали асфальтовый пролет, в который были встроены датчики. На рисунке 2 показана установка ВОД в смесь мелкого заполнителя и асфальта.



Рисунок 2 – Установка ВОД в асфальт

ВОД может выдержать процесс укладки, так как внешние интерфейсы плотно склеены с интерфейсами асфальтобетонной смеси, что означает возможность использования датчиков на основе ВРБ, упакованных в мелкий заполнитель, для мониторинга асфальтового покрытия.

Можно оценить и спрогнозировать данные со встроенных оптических датчиков ВРБ, которые предоставляют необходимую информацию о том, как конструкция дорожного полотна выдерживает нагрузку, и информацию об интенсивности движения на определенном участке дороги, а также о сроке службы дорожного полотна.

Таким образом, он обеспечивает оптимальную конструкцию будущего дорожного покрытия с учетом необходимых требований и ограничений, а также эффективное использование, техническое обслуживание и своевременный ремонт дорог общего пользования, что напрямую влияет на общую безопасность транспортной системы.

Вывод. Для получения подробную информации о конструкциях дорожного покрытия требуется целая система мониторинга. Это система должна учитывать особенности асфальтового покрытия. Из-за сложных характеристик конструкций дорожного покрытия, для мониторинга их состояния в качестве чувствительного элемента было выбрано ВОД на основе ВРБ. В этой статье дан обзор применения датчиков и получения данных с датчиков для мониторинга усадки конструкции дорожного покрытия, в будущем планируется проведены гораздо более глубокие исследования и усовершенствования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.У.Калижанова, Г.Б.Кашаганова, А.Х.Козбакова, Д.Едилхан, Ж.Е.Амиргалиева, Ж. Оразбеков. Анализ и исследование существующего опыта проектирования и использования различных современных волоконно-оптических датчиков для контроля состояния механических и строительных конструкций. Вестник КазАТК №3 (118), 2021.с. 112-123
- [2] G. Rajan, Ed., Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications, University of New South Wales, School of Electrical Engineering and Telecommunications, UNSW Australia, CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.
- [3] M. D. Fatima, F. Domingues, and A. Radwan, Optical Fiber Sensors for IoT and Smart Devices, Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering, I3N & Physics Department, University of Aveiro, Portugal, 2017.
- [4] Y. C. Manie, R. K. Shiu, P. C. Peng et al., “Intensity and wavelength division multiplexing FBG sensor system using a Raman amplifier and extreme learning machine,” Journal of Sensors, vol. 2018, Article ID 7323149, 11 pages, 2018
- [5] Zhou, Z.; Liu, W.Q.; Huang, Y.; Wang, H.P.; He, J.P.; Huang, M.H.; Ou, J.P. Optical fiber Bragg grating sensor assembly for 3D strain monitoring and its case study in highway pavement. Mech. Syst. Signal Process. 2012, 28, 36–49.
- [6] Yuan, H.Q.; Yuan, J.; Du, J. The sensing principle of FBG and its experimental application in structure strengthening detection. J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. 2003, 18, 94–96.
- [7] Zhang, A.P.; Gao, S.R.; Yan, G.Y.; Bai, Y.B. Advances in optical fiber Bragg grating sensor technologies. Photonic Sens. 2012, 2, 1–13.

ӘОЖ 621.3 (042)

К.Т. Керимбаев^а, Е.Т. Керімбай^б

М.Тынышбаев атындағы Қазақ көлік және коммуникациялар академиясының Шымкент көлік колледжі, Шымкент, Қазақстан

^аkanatbek_271189@mail.ru, ^бbertargyn_97@mail.ru

ЖАЛПЫ КӘСІПТІК ЖӘНЕ АРНАЙЫ ПӘНДЕРДІ ОҚЫП-МЕНГЕРУДЕ КОМПЬЮТЕРЛІК ПРОГРАММАЛАРДЫ ПАЙДАЛАНУДЫҢ ӘДІСТЕРІ

Аңдатпа. Ақпараттық компьютерлік және бағдарламалық-техникалық кешенді технологияларды пайдаланып, тәжірибелік және математикалық компьютерлік