

О. Г. КЕСАРІЙСЬКИЙ (ТОВ «Лабораторія комплексних технологій»), Ю. Л. ЗАЯЦЬ,
П. О. ПШІНЬКО (ДІПТ)

ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРНО-ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ

В статті наведено результати дослідження залізобетонного елемента за допомогою методу лазерної інтерферометрії.

Ключові слова: залізобетонна шпала, напружено-деформований стан, лазерна інтерферометрія

В статье представлены результаты исследования железобетонного элемента при помощи методов лазерной интерферометрии.

Ключевые слова: железобетонная шпала, напряженно-деформированное состояние, лазерная интерферометрия

The article is dealt with the results of research of the reinforced concrete element by means of the laser interferometry method.

Keywords: reinforced concrete sleeper, stressed-and-strained state, laser interferometry

Вступ

Починаючи з 2000 року на залізницях України спостерігається масовий вихід з ладу залізобетонних шпал. У більшості випадків причиною появи дефектів була неналежна якість бетону. Через те виникла необхідність неруйнівного контролю якості готових залізобетонних шпал, для гарантування їх нормативного строку служби та безпеки перевезень на залізниці.

Існуючі методи неруйнівного контролю такі як ударно-імпульсний, використання ультразвукових приладів, електротензометрія та інші, надають недостатньо інформації про готовий залізобетонний виріб через те, що вони оперують обмеженим об'ємом даних лише по окремим складовим елементам (бетон, армування, тощо), а не контролюють роботу конструкції в цілому. А для контролю якості залізобетонних шпал необхідне комплексне визначення якості виробу як однієї суцільної конструкції, щоб гарантувати безвідмовну роботу шпали у верхній будові колії під навантаженням, що потребує більш точних та ефективних методів неруйнівного контролю якості залізобетонних елементів.

Мета досліджень

Метою даної статті стало висвітлення лазерно-інтерференційного методу аналізу напружено-деформованого стану конструкцій який

можливо застосовувати для визначення якості залізобетонних залізничних шпал.

В авіаційно-космічній техніці вже більше 30 років успішно застосовуються лазерно-інтерференційні методи визначення полів деформацій та переміщень. Перевагами лазерно-інтерференційних методів дослідження – голографічної інтерферометрії та спекл-інтерферометрії, включаючи електронну кореляційну спекл-інтерферометрію є те, що експериментальні виміри є прямими та прецизійними, виконуються як на оптично прозорих, так і дифузно-розсіюючих тілах, вони безконтактні та безінерційні, що дозволяє проводити експерименти в широкому діапазоні статичних та динамічних навантажень при переміщеннях в діапазоні від 0,1 до 100 мкм, який може бути суттєво розширений.

Існуючий прогрес в області квантової електроніки, електронної оптики та обчислювальної техніки дозволив розширити область використання лазерно-інтерференційних методів дослідження напружено-деформованого стану.

При вирішенні задач дослідження як самого бетону так і бетонних, та залізобетонних елементів, лазерні інтерференційні методи виділяє широка гамма вирішуваних задач, до числа яких можливо віднести вивчення власних деформацій бетону, виявлення силових тріщин, вивчення явища усадки бетону на ранніх стадіях твердіння, температурні та вологісні деформації бетону з різноманітними заповнювачами.

Результати досліджень

Для наглядної демонстрації можливостей лазерно-інтерференційного методу, як такого, що дозволяє встановити неруйнівним методом якість залізобетонних шпал нами був проведений експеримент. Об'єктом дослідження в даному експерименті став процес визначення напружено-деформованого стану залізобетонних елементів, армованих звичайною арматурою, а предметом дослідження стала залізобетонна балка, розмірами $100 \times 100 \times 400$ мм.

Опис експерименту:

При виконанні досліджень по вивченню процесу тріщино-утворення в бетонній балці використовувалась схема реєстрації голограм за методом Лейта-Упатнієкса, що показана на рис. 1.

Промінь гелій-неонового лазера 1 (ЛГН 215) за допомогою дзеркала 2 спрямовувався на світлорозподільну призму 3. За допомогою дзеркала 4 та мікрооб'єктиву 5 формувалась предметний світловий потік для освітлення поверхні бетонної балки 6, що досліджувалась. Опорний світловий потік був реалізований за допомогою дзеркала 7 та мікрооб'єктиву 8.

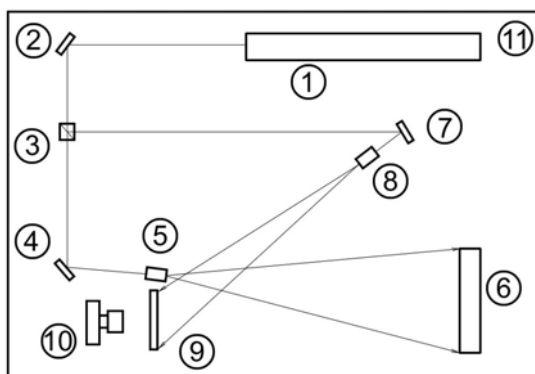


Рис. 1. Схема реєстрації голограм за методом Лейта-Упатнієкса

Для реєстрації голограм використовувались фотопластини ПФГ-03, які закріплювалися в рамці-тримачі 9.

З метою забезпечення високої стабільності схеми вимірювання, предмет дослідження та оптична схема монтувалися на віброзахисній платформі 11, яку виконано у вигляді жорсткої металевої плити, розміщеної на пневматичних амортизуючих подушках.

Опорний та предметний світлові потоки орієнтували по відношенню до об'єкту так, щоб бісектриса кута між оптичними осями опорного та предметного світлових потоків співпадала з нормаллю до поверхні об'єкту, що досліджувалась. Така реалізація схеми реєстрації голографічних інтерферограм дозволила забезпечити

максимальну чутливість вимірювань до нормальної компоненти вектора переміщень.

Під час дослідження процесу тріщино-утворення використовувався метод голографічної інтерферометрії подвійної експозиції. Для цього піддослідну балку попередньо навантажували незначним згинальним моментом та проводили реєстрацію голограм. Потім згинальний момент збільшували на задану величину та повторно експонували ту ж саму фотопластину. Після другої експозиції фотопластина піддавалася фотохімічній обробці, а після сушки встановлювалася на місце експонування у рамку 9. Для отримання фотознімку інтерферограми, предметний промінь між світлорозподільником 3 та дзеркалом 4 перекривався світло-непроникним екраном, а відтворене зображення фіксувалося за допомогою цифрової фотокамери 10.

В процесі експерименту було виявлено, що в досліджуваному зразку під впливом навантаження реалізувалися процеси текучості, що значно знижують контраст інтерференційних смуг на інтерферограмах, що призводить до ускладнення їх подальшої обробки. Для часткової компенсації цього ефекту, піддослідна поверхня вкривалася тонким шаром алюмінієвої пудри. Таке рішення дозволило скоротити час експонування до 4...5 с. Короткий час експонування дозволив значно збільшити контраст інтерференційних смуг, проте навіть при цьому на інтерферограмах виразно виявляються зони локалізації ефектів повзучості.

Серія експериментів проводилася шляхом послідовної реєстрації інтерферограм зі ступінчастим збільшенням навантаження. Максимальний рівень навантаження, що був досягнутий в попередньому циклі реєстрації, був вихідним рівнем для наступного циклу. Таким чином, було отримано серію інтерферограм, що відображала зміну поля переміщень піддослідної поверхні бетонної балки від моменту зародження тріщин до моменту повного її руйнування.

Досліджувана залізобетонна балка виготовлялась за схемою, що показана на рис. 2.

Для виготовлення балки був використаний бетон класу В40, характеристики якого відповідають вимогам, що встановлюються для шпального бетону.

Балка навантажувалася за схемою, що показана на рис. 3.

Балка навантажувалася поступово, з реєстрацією інтерферограм після кожного кроку навантаження. Результати експерименту наведені в табл. 1.

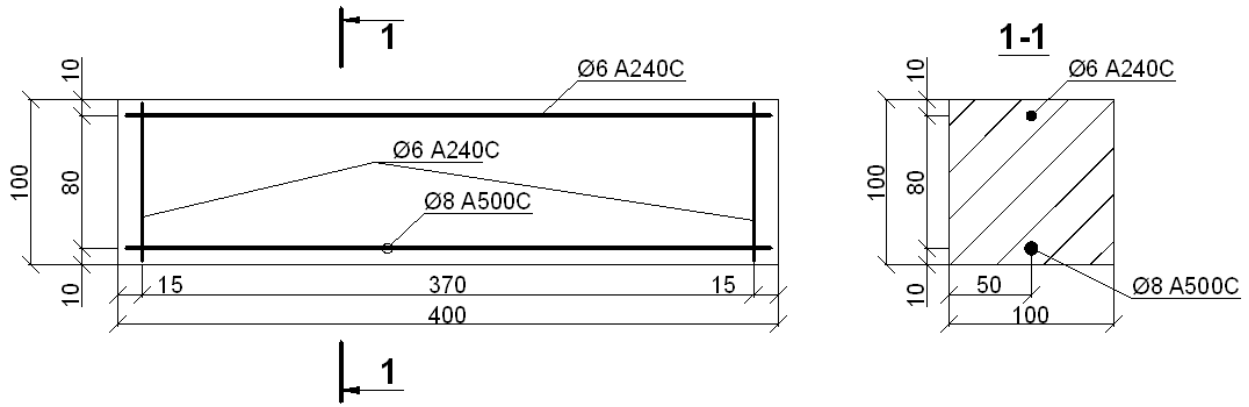


Рис. 2. Схема виготовлення досліджуваної залізобетонної балки

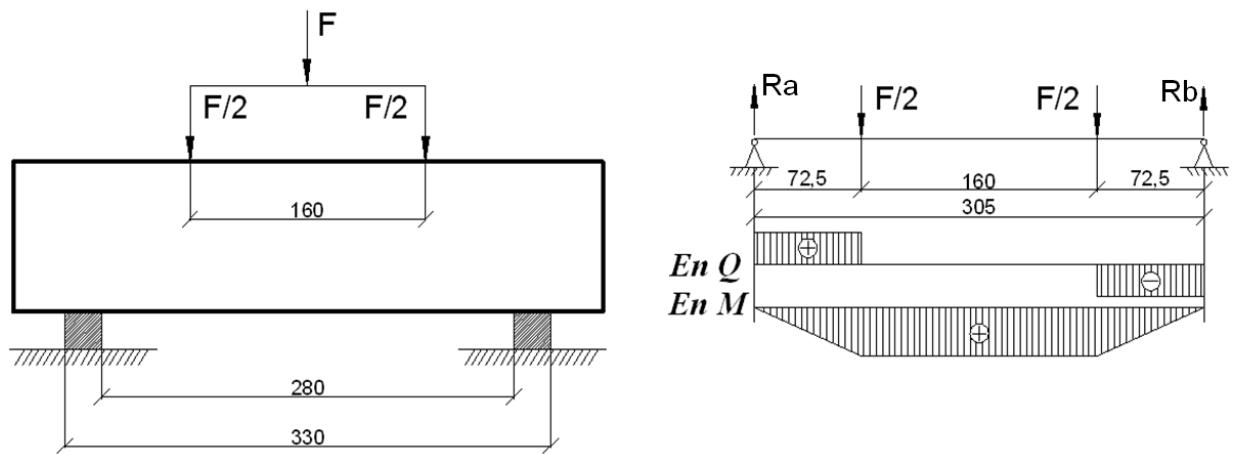


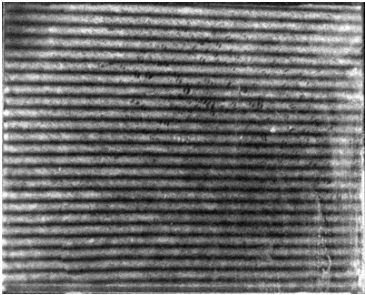
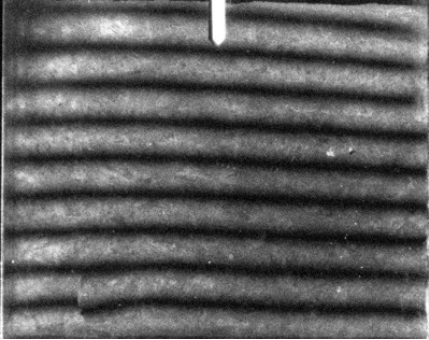

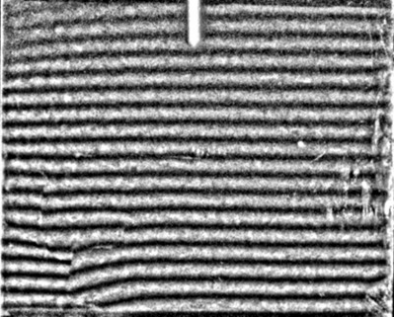

Рис. 3. Схема навантаження балки

Таблиця 1

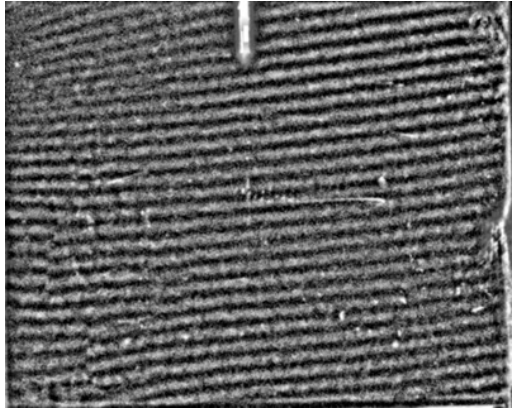
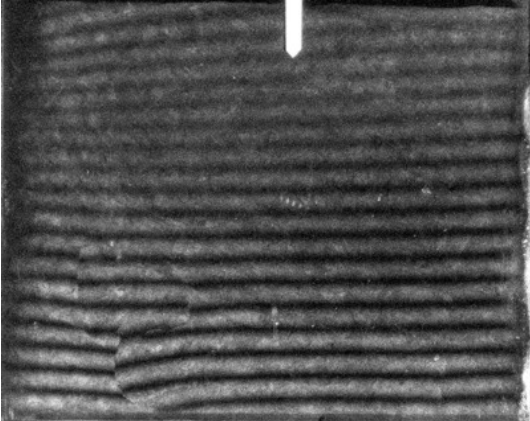
Результати експерименту

№ з/п	F_1 , кН	F_2 , кН	Вигляд інтерферограми	Примітки
1	2	3	4	5
	8,56			Попереднє навантаження, для усунення деформацій поверхневого шару і розподілу деформацій на опорах (інтерферограма не реєструвалася).
1	4,28	8,56		Висока частота інтерференційних смуг, отриманих на пробній інтерферограмі, не дозволила провести їх фотографування. Наступні ступені навантаження були направлені на визначення прийнятності, з точки зору подальшої обробки, діапазону навантажень.

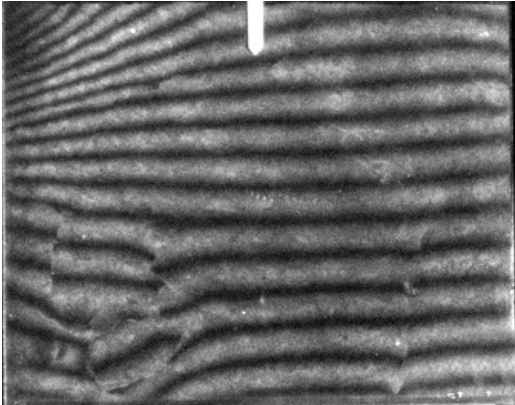

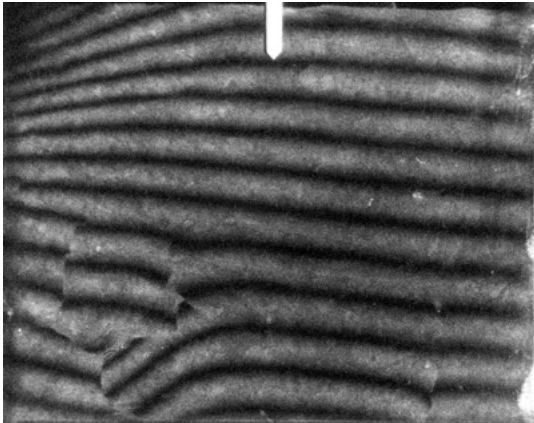

Таблиця 1 (продовження)

1	2	3	4	5
2	12,84	14,12		<p>Рівномірний розподіл інтерференційних смуг свідчить про відсутність локальних дефектів. Під впливом навантаження піддослідна поверхня нахиляється, що пов'язано з умовами закріплення та навантаження.</p>
3	25,68	26,96		<p>Поява першої тріщини, яка виявляється за розривами та спотворенням інтерференційних смуг в лівій нижній частині інтерферограми. Співставлення інтерферограми 3 з фотографією аншлафу дозволяє прив'язати локалізацію тріщин з контуром великого щелевеного заповнювача. Візуально прояв тріщин не спостерігається, але внутрішні зв'язки в цій зоні піддалися руйнуванню.</p>
				
4	39,38	41,09		<p>При досягненні навантаження 41,09 кН виразно спостерігається зона появи тріщини. Вона відповідає ділянці, що була виявлена раніше, однак протікає активний розвиток лівої гілки і формується права. Візуально прояв тріщин не спостерігається.</p>
				

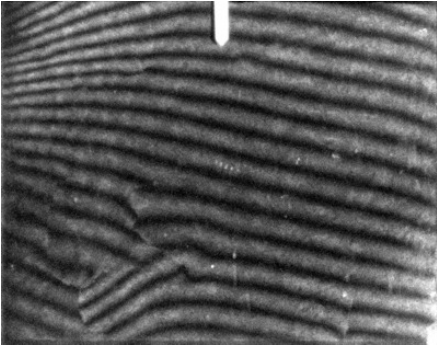
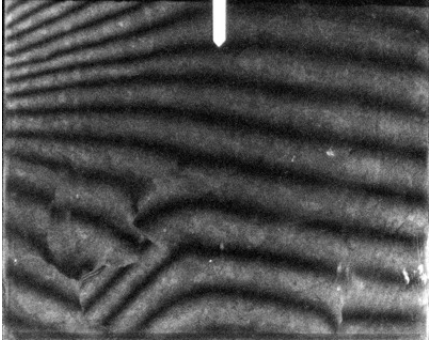

Таблиця 1 (продовження)

1	2	3	4	5
5	42,8	44,94		<p>Низький контраст смуг у верхній частині підслідного зразка пояснюється тим, що за час експозиції (15 с) протікає явище повзучості бетону під навантаженням, спостерігається поява нової тріщини в правій частині інтерферограми. Візуально тріщини не спостерігаються.</p>
6	44,94	47,08		<p>Незначне збільшення навантаження призводить до того, що частина тріщин закривається. Це можна пояснити перерозподілом внутрішніх напружень в структурі матеріалу і явищем «заклинювання» окремих часток в каркасі бетону. Також у верхній частині активно протікає явище повзучості бетону, цей факт видно через зниження контрасту інтерференційних смуг.</p> <p>Візуально тріщини не спостерігаються.</p>

Таблиця 1 (продовження)

1	2	3	4	5
7	51,36	53,5		<p>Суттєве збільшення навантаження призводить до різкого збільшенню тріщин праворуч. Спостерігається вклинювання локального фрагменту. В лівій частині інтерферограми формується нова гілка тріщини, що охоплює великий фрагмент щебеню в структурі бетону.</p> <p>Візуально тріщини не спостерігаються.</p>
				
8	55,64	57,78		<p>Спостерігається руйнування зв'язків навколо щебеневого заповнювача. Візуально проявів тріщин не видно.</p>
				

Таблиця 1 (закінчення)

1	2	3	4	5
9	59,92	62,06		Ріст тріщин призведе до часткового розвантаження, що змінює силову взаємодію виклинуваної частини з основним масивом.
10	64,2	66,34		На фоні порівняно рівномірних смуг деформації основного масиву виразно проявляються блоки, що сформовані виклинуванням щебеню та ділянка, утворена вертикальними тріщинами. Активний розвиток лівої сітки тріщин гальмує розвиток правої лінійної тріщини.
				

Під час проведення експерименту міцність балки перевищила граничне навантаження експериментального пресу, через це балка не була зруйнована. Але експерименти, що були поставлені раніше над стандартними зразками бетонних кубів $100 \times 100 \times 100$ мм дають можливість стверджувати, що якби балка була зруйнована в зоні чистого згину через появу норма-

льних тріщин, то їхній вигляд мав би відповідати зображенню в п. 10 табл. 1.

Для співставлення результату експерименту з теоретично визначеними значеннями руйнівного навантаження балки, було виконано розрахунки міцності балки згідно до СНиП 2.03.01-84*. В результаті розрахунків було отримано такі величини: руйнівне навантаження для балки становить $F = 73,3$ кН; величина

навантаження, за якого з'являються перші тріщини – $F = 16,8$ кН. Ці значення відповідають тим, що були отримані експериментально, оскільки перша тріщина, яка була зафіксована на інтерферограмі, з'явилася на інтервалі навантаження F від 14,12 до 26,96 кН, а при макси-

мальному навантаженні $F = 66,34$ кН візуально балка залишалася цілісною.

За результатами експерименту було побудовано графіки поля нормальних переміщень, що зображені на рис. 4 та 5.

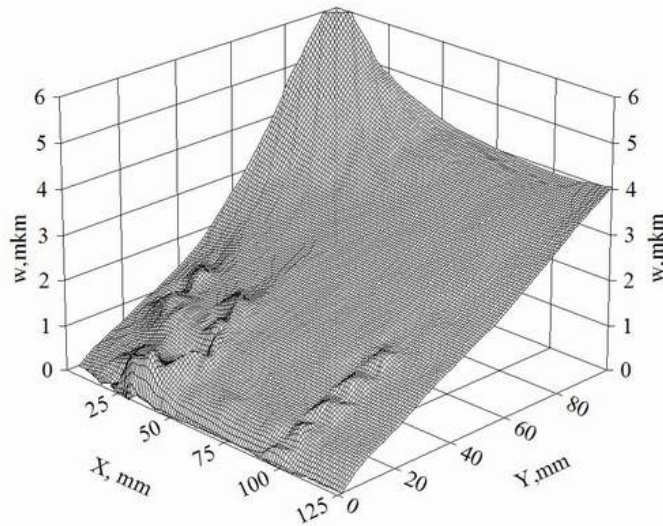


Рис. 4. Графік поля нормальних переміщень поверхні зразка при зміні навантаження від 51,36 до 53,5 кН

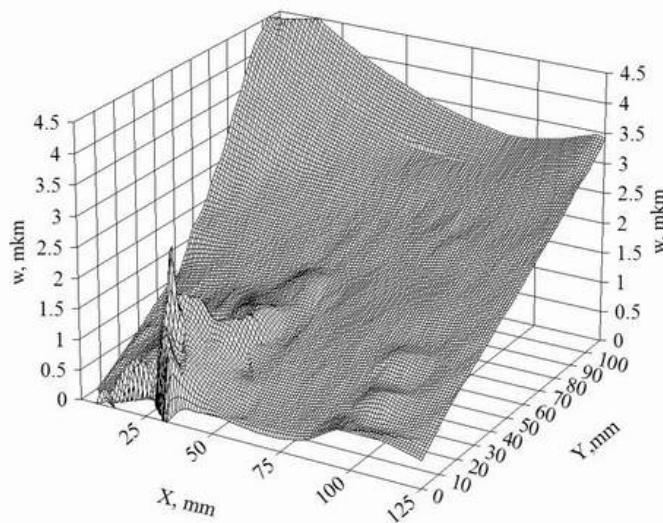


Рис. 5. Графік поля нормальних переміщень поверхні зразка при зміні навантаження від 64,2 до 66,34 кН

Висновки

1. Методи лазерної голографічної інтерферометрії можуть бути застосовані для визначення дефектів залізобетонних та бетонних елементів, що дозволить неруйнівним методом оцінити відповідність виробу чи конструкції поставленим до них вимогам.

2. За допомогою методів лазерної голографічної інтерферометрії є можливість вимірювати деформації поверхні бетонних та залізобетонних елементів і, на відміну від звичайних методів вимірювання, таких як тензометрія, існує можливість отримувати трьохвимірний вектор переміщення будь-якої точки поверхні у просторі.

3. Методи лазерної інтерферометрії, реалізовані на принципах електронної кореляційної інтерферометрії, можуть бути застосовані при відпускнуому контролі якості залізобетонних шпал із заводу-виробника, контролі якості шпального бетону без руйнування самої шпали.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]. – М., 1989.
2. Железобетонные шпалы для рельсового пути [Текст] / А. Ф. Золотарский [и др.]. – М.: Транспорт, 1980.
3. ЦП-0150. Технічні вказівки з використання старопридатних матеріалів верхньої будови колії на залізницях України [Текст]. – К.: Науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства Укрзалізниці (НКТБ ЦП УЗ), 2006.

4. Исследование деформационных характеристик бетонных образцов лазерно-интерференционными методами [Текст] / А. Г. Кесарийский [и др.] // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ. – № 4. – СПб., 2009.
5. Особенности поведения бетона на плотных заполнителях под нагрузкой [Текст] / Е. В. Кондращенко [и др.] // Науковий вісник будівництва ХДТУБА ХОТВ АБУ. – Вип. 59. – Х., 2010.
6. Кесарийский, А. Г. Применение лазерно-интерференционных методов измерения напряженно-деформированного состояния деталей и узлов для повышения конструктивного совершенства изделий машиностроения [Текст] / А. Г. Кесарийский, А. Н. Клишин // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. НТУ «ХП». – Вип. 2 (15). – Х., 2007.

Надійшла до редколегії 17.11.2010.

Прийнята до друку 22.11.2010.