



16-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA**,  
vykusios 2013 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 16th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 8 May 2013, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 16-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 8 мая 2013 г., Вильнюс, Литва

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ БАЛОК ПРИ МАЛОЦИКЛИЧНЫХ НАГРУЗКАХ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Пётр Коваль<sup>1</sup>, Ярослав Ковальчик<sup>2</sup>, Юрий Мольков<sup>3</sup>, Олег Грымак<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальная академия изобразительного искусства и архитектуры, Киев, Украина

<sup>2</sup>Национальный транспортный университет, Киев, Украина

<sup>3</sup>Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Львов, Украина

<sup>4</sup>Национальный Университет «Львовская политехника», Львов, Украина

Эл. почта: <sup>1</sup>Koval\_pm@meta.ua, <sup>2</sup>Kovalchik\_Yaroslav@ukr.net, <sup>3</sup>yuraghf@rambler.ru, <sup>4</sup>grymak5oleg@gmail.com

**Аннотация.** Исследовано влияние малоцикловых нагрузок на увеличение деформаций, прогибов и ширины раскрытия трещин при испытании предварительно напряженных железобетонных балок. Показана связь между фиксацией трещинообразования визуальным наблюдением, методом цифровой корреляции изображений и методом акустической эмиссии.

**Ключевые слова:** железобетонные предварительно напряженные балки, малоцикловые нагрузки, цифровая корреляция изображений, акустическая эмиссия.

### Введение

Создание предварительно напряженных элементов из железобетона в начале XX века позволило расширить диапазон возможного использования железобетонных конструкций. Но и в XXI веке в ряде случаев железобетонные пролетные строения мостов устраиваются без предварительного напряжения.

Государственным дорожным научно-исследовательским институтом им. М.П. Шульгина (Киев) были проведены натурные обследования, испытания и мониторинг состояния автодорожных железобетонных мостов, построенных в последние десятилетия в Украине. В результате был сделан вывод, что для обеспечения необходимой долговечности таких мостов в 80-100 лет, на автодорогах с высокой интенсивностью движения для балочных и рамных пролетных строений с пролетами более 15 м необходимо использовать только предварительно напряженные конструкции.

Исследования и мониторинг показывают наличие малоцикловых нагрузок с уровнями нагрузок  $\eta_{\text{cyc}}^{\text{low}} = 0.30 \dots 0.57$ ,  $\eta_{\text{cyc}}^{\text{top}} = 0.45 \dots 1.00$  при эксплуатации и испытании автодорожных мостов Украине (Полюга Р.И., 2006). Действующие нормы по расчету и проектированию мостов не учитывают специфики влияния на них малоцикловых нагрузок. Необходимо исследовать влияние таких нагрузок на предварительно напряженные железобетонные конструкции мостов и учесть их действие при расчетах. Проблему малоциклового усталости следует рассматривать как проблему предельного деформирования. Итак, при учете малоцикловых нагрузок в работе железобетонных конструкций необходимо усовершенствовать расчеты по второй группе предельных состояний, а именно расчет на трещиностойкость. Поэтому малоцикловые нагрузки имеют непосредственное влияние на срок эксплуатации конструкций автодорожных мостов и их остаточный ресурс.

Для внедрения новых эффективных предварительно напряженных железобетонных конструкций пролетных строений мостов необходимо проводить научные исследования их моделей и натуральных объектов. При этом используются как традиционные методы исследований: визуальный, тензометрический, ультразвуковой, и другие (Лучко Й.Й. 2001), так и относительно новый метод акустической эмиссии (АЭ) (Скальский В.Р. 2005), который позволяет изучать процессы возникновения и образования трещин на разных этапах работы конструкций. Увеличить объем информации о работе элемента во время исследований, получить визуальную картину распределения относительных деформаций по его объему дает возможность метод цифровой корреляции изображений (ЦКЗ, DIC) (Bing Pan1, 2009; M. Malesa)

*Цель* данных исследований – изучить напряженно-деформированное состояние предварительно напряженных балок при малоцикловых нагрузках и возможность использования при этом метода ЦКЗ для фиксации относительных деформаций и процессов трещинообразования.

## Исследование

Испытывались две предварительно напряженные железобетонные балки геометрических размеров 100×210×2100 мм. Прочность бетона на момент испытания составляла 38,92 МПа (В 30).

Программа испытаний включала испытания на малоциклические нагрузки до 60 и 75 %  $P_{кр}$  согласно схеме на рис. 1 поэтапными нагружениями.

Испытания балок (рис. 2) проводили на стенде, который позволял вести визуальное наблюдение за возникновением и распространением трещин на гранях балки (рис. 4а). Нагрузка передавалась через силораспределительную traversу на балку двумя сосредоточенными силами, создавая таким образом зону чистого изгиба, в рамках которой исследовали напряженно-деформированное состояние нормальных сечений по высоте балки.

Для регистрации продольных относительных деформаций посередине стороны 1 балок равномерно по высоте установлены пять тензодатчиков с базой 50 мм сопротивлением 310 Ом. Их показания дублируются пятью индикаторами с ценой деления 0,001 мм и базой 200 мм, прикрепленных параллельно тензодатчиков (рис. 3, 4б). Для фиксации сигналов акустической эмиссии (АЭ) на балке крепился датчик АЭ, который был подключен к программно-технического

комплексу (ПТК) «АКЕМ». ПТК «АКЕМ» (с выходом на один датчик) построен на базе персонального компьютера с использованием технологии «PCLabCard». Усиление сигнала АЭ осуществлялось предварительным усилителем с чувствительностью на входе 10 мкВ, частотным диапазоном 100–2000кГц, коэффициентом усиления 70–90 дБ и с динамическим диапазоном 40–65 дБ. Полоса среза фронта низких частот 9кГц. Время регистрации сигналов АЭ при каждом пригрузении составляло 3–5 мин.

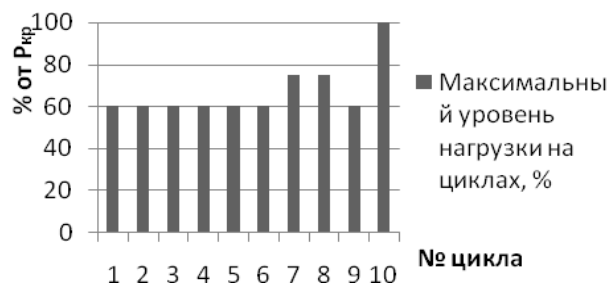


Рис. 1. Схема малоциклических нагрузок

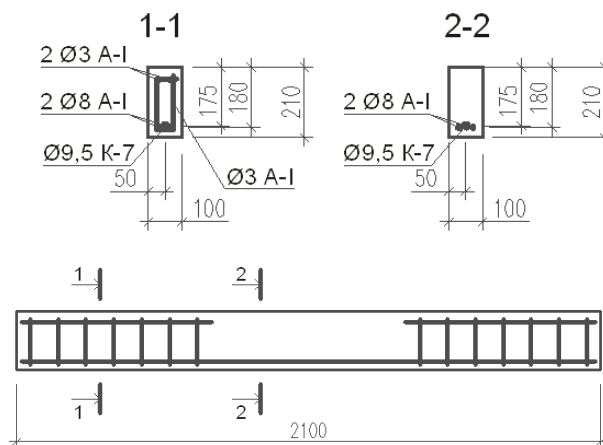


Рис. 2. Конструкция опытных образцов

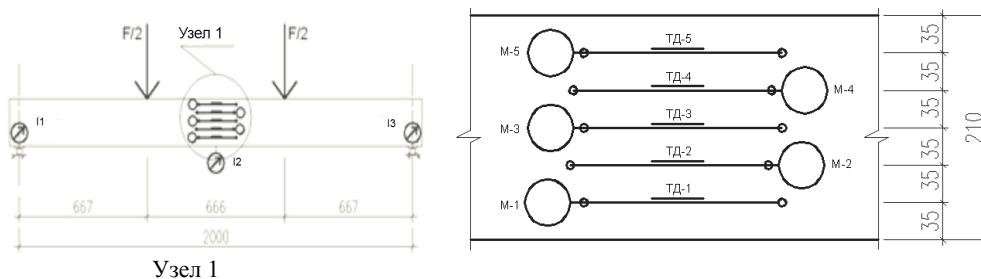
На противоположной стороне 2 выполнен специальный набрызг аэрозольной краской площадью 20×50 см для измерения деформаций в средней зоне балки с использованием метода ЦКЗ (Рис. 4). В данной работе для получения изображений ЦКЗ использовали фотокамеру Nikon D–40 на штативе. Прогобы посередине балки и изгибы на ОП1, ОП2 замерялись индикаторами часового типа I (рис.3).

Данные тензодатчиков, индикаторов, прогибомеров и фото снимались после выдержки при каждом пригрузении. При каждом пригрузении железобетонных балок фиксировались сигналы АЭ.

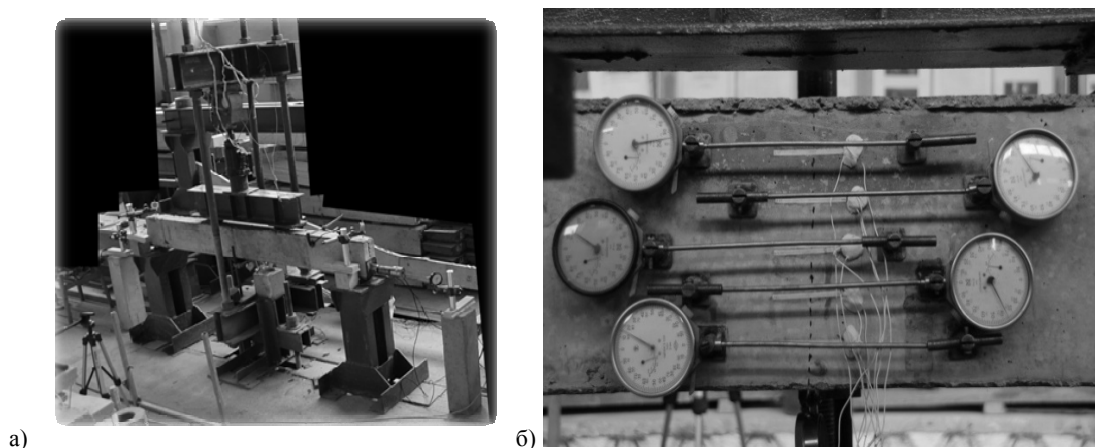
При малоцикловой нагрузке балки первые циклы доводились до 60 %  $P_{кр}$ . При этом ширина раскрытия самых трех-четырех трещин в зоне действия максимальных моментов была примерно равна ширине раскрытия допустимой при эксплуатации мостов 0,2 мм по [6]. Раскрытие трещин стабилизировалось на 5–6 цикле (рис. 5 а, б). При дальнейшем увеличении нагрузки на 7–8-м цикле до 75%  $P_{кр}$  ширина раскрытия всех трещин существенно увеличилась. На рис. 5 в, г представлены вид напряженно-деформированного состояния балки перед разрушением.

На диаграммах рис. 6 продемонстрировано относительные деформации растянутой и сжатой зоны балки при малоцикловых нагрузках. Относительные деформации растянутой зоны на 7-ом цикле (60 %  $P_{кр}$ ) увеличились на 73 %, а на 10-ом (75 %  $P_{кр}$ , перед раз-

рушением) на 126 %. Методом АЭ зафиксировано сигналы  $Kp$  которые свидетельствуют о том, что на первом цикле до уровня нагрузки 16–18 кН на балках не образовывались трещины (не наблюдалось сигналов  $Kp > 6$ ) (рис. 7а). Уже при 20–22 кН наблюдается образование трещины ( $Kp > 6$ ) (рис. 7б), о чем свидетельствует перелом графика деформаций на рис. 6а. При последующих циклах сигналы образование новых и распространение существующих трещин наблюдались только на последних одном-двух пригрузах (рис. 7в). На седьмом цикле (при повышении максимальной нагрузки от 60% до 75%) наблюдаются сигналы  $Kp$  на каждом пригрузом (рис. 7г). Данные трещинообразования акустической эмиссии можно сопоставлять с визуальной картиной деформаций опытного участка ЦКЗ (рис. 5), где можно наблюдать рост ширины раскрытия трещин.



**Рис. 3.** Схема расположения приборов: I-1 ... I-3 – индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм; М-1... М-5 – индикаторы часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 200мм; ТД-1...ТД-5 – тензодатчики с базой 50 мм



**Рис. 4.** Испытания балки. а – общий вид испытания, б – микроиндикаторы и тензодатчики на стороне 1 балки

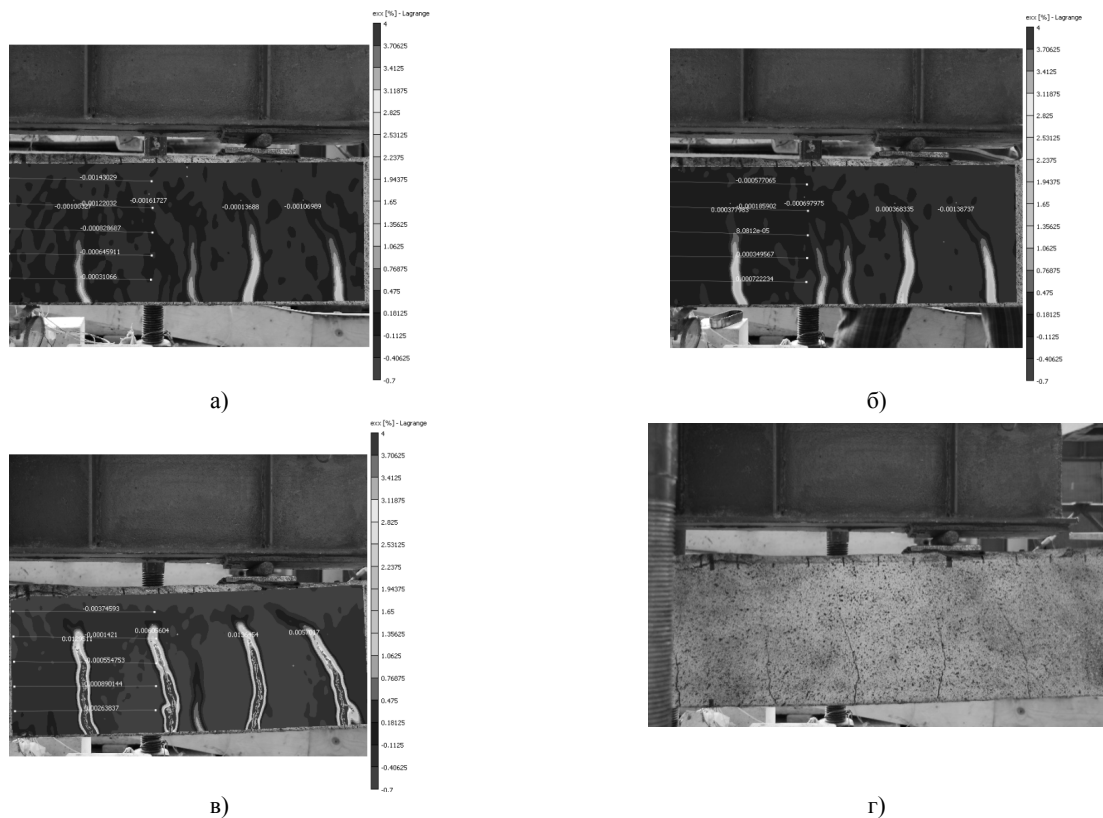


Рис. 5. Картины относительных деформаций балки, зафиксированные методом ЦКЗ:  
а – 1-ый цикл, 42 кН, б – 7-ой цикл, 42 кН, в – 10-ый цикл, 70 кН; г – вид опытного участка на десятом цикле при 70 кН

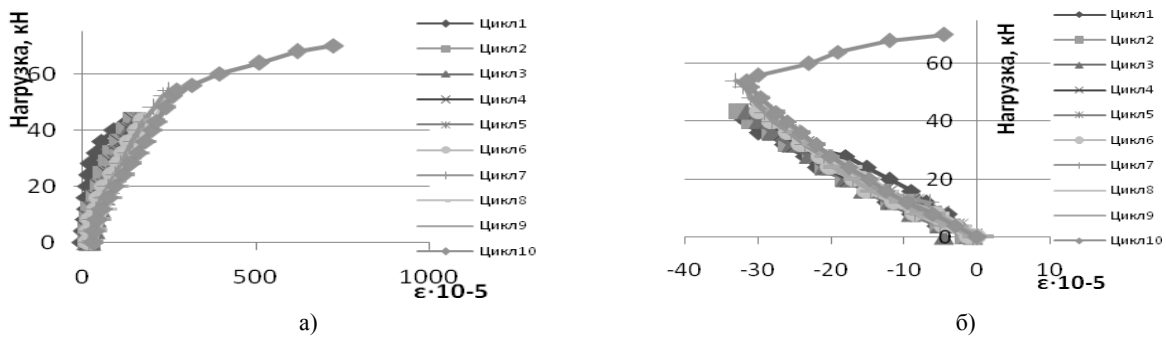


Рис. 6. Относительные деформации по высоте балки при малоциклового нагрузках:  
а – низ балки (растянутая зона), б – верх балки (сжатая зона)

На графиках на рис. 8, 9 четко фиксируется стабилизация прогибов и раскрытия трещин в балках до 6..7-го цикла а также дальнейший их рост при увеличении предельной нагрузки на цикле. По сравнению с прогиб-ом на первом цикле прогиб на седьмом (цикл на котором произошла стабилизация) увеличился на 1,06 и 1,04 мм (12,25 и 13,35 %). Раскрытие всех трещин балок увеличилось на 28 и 34 %, а самой большой - на 28 и 29%. На 10-м цикле при нагрузке 75 %  $R_{кр}$  прогибы увеличились на 5,24 и 5,85 мм (по 66 %)

относительно максимальных прогибов на первом цикле. Раскрытие всех трещин балок увеличилось на 126 и 152 %, а самой большой – на 94 и 106 %.

Обе балки разрушились вследствие разрушения бетона в верхней зоне (рис. 10).

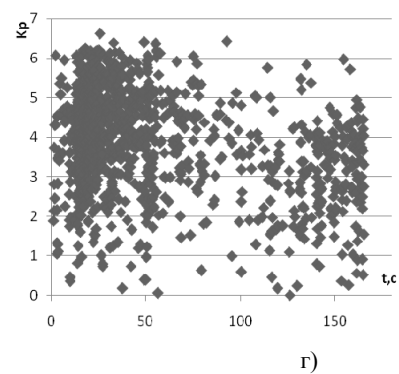
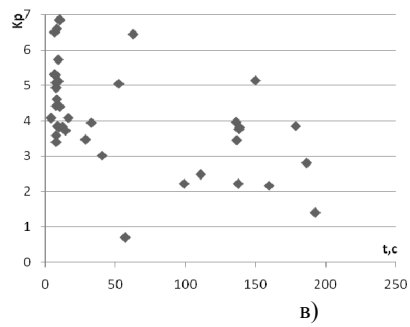
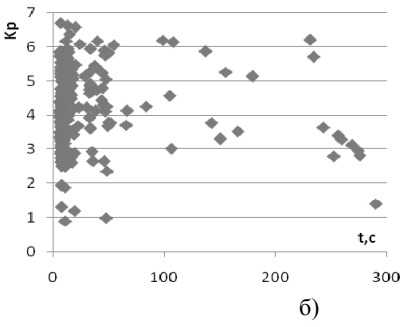
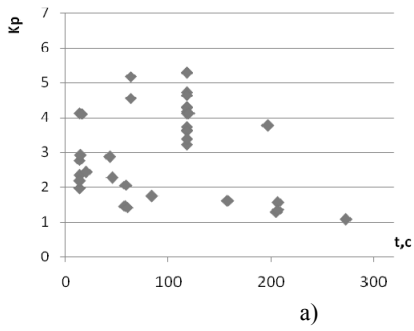


Рис. 7. Сигналы  $K_p$

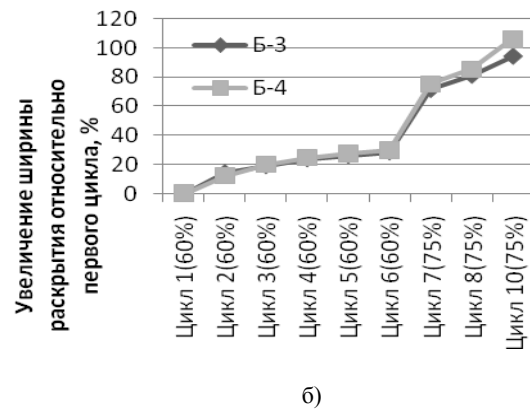
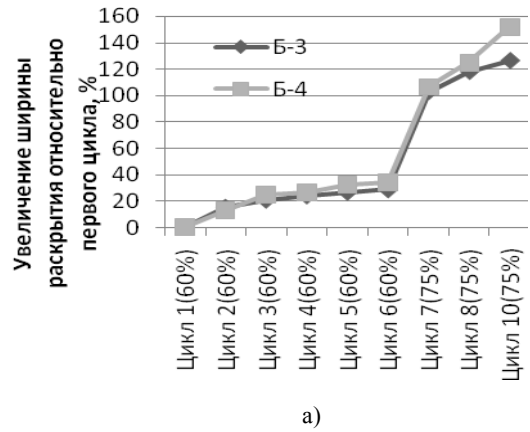


Рис. 8. Процент увеличения ширины раскрытия трещин: а – всех трещин балки, б – самой большой трещины

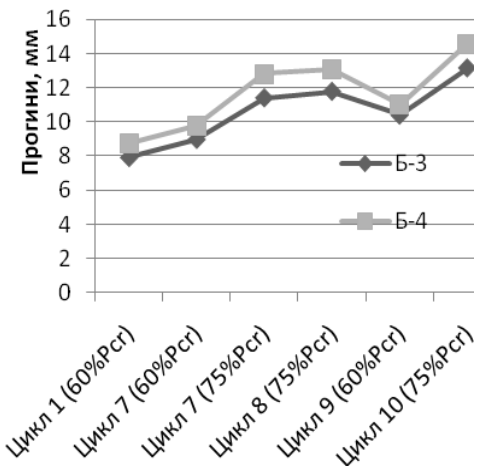


Рис. 9. Прогибы балок Б-3, Б-4

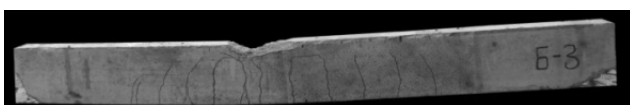


Рис. 10. Вид разрушенных балок

## Выводы

Установлено влияние малоцикловых нагрузок высокого уровня на напряженно-деформированное состояние предварительно-напряженных балок. При используемой в исследовании схеме малоциклических нагрузок получено увеличение соответствующих величин при 60%  $R_{кр}$ : ширины раскрытия трещин на 28,5%, прогибов 13,3%; при 75%  $R_{кр}$ : ширины раскрытия трещин на 100%, прогибов на 66%. Полученные результаты необходимо учитывать при расчете таких конструкций которые работают при малоциклических нагрузках высокого уровня.

Метод цифровой корреляции изображений дает возможность фиксировать картину изменения относительных деформаций и процессов трещинообразования при загрузке железобетонных балок. Данные ЦКЗ четко коррелируются с сигналами АЭ.

## Литература

1. Лучко Й.Й. 2001. *Методы исследования и испытания зданий, материалов и конструкций* / Й.Й. Лучко, П.Н. Коваль, М.Л. Демьян. Львов: Каменяр, 436с.
2. Полюга Р.И. 2006. *Трещиностойкость железобетонных балочных конструкций автодорожных мостов в условиях малоциклового нагружения*: дис. канд. техн. наук: Полюга Роман Игоревич. – Львов: Национальный университет «Львовская политехника». 160 с.
3. Скальский В.Р. 2005. *Акустическая эмиссия при разрушении материалов, изделий и конструкций*. Коваль - Львов, СПО-ЛВС. 396с.
4. Bing Pan1, Kemaο Qian, Huimin Xie and Anand Asundi. 2009. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review/ *Meas. Sci. Technol.* 20, 062001: 17.
5. M. Malesa/Monitoring of civil engineering structures using Digital Image Correlation technique [Electronic resource] / M. Malesa, D. Szczepanek, M. Kujawińska, A. Świercz, P. Kołakowski // *14-th International Conference on Experimental Mechanics*. – Mode of access: <<http://smart.ippt.gov.pl>>