



УДК 624.012:53.09



ФОМІН С. Л. Д-р технічних наук, проф., Харківський національний університет будівництва та архітектури, м Харків, Україна, e-mail: Sfomin@ukr.net, тел. +38 (097) 350-62-47, ORCID: 0000-0001-9146-0464



ІЗБАШ Ю.М. Аспірант, Харківський національний університет будівництва та архітектури, м Харків, Україна, e-mail: izbash91@gmail.com, тел. +38 (050) 402-99-39, ORCID: 0000-0002-0936-0518



ПЛАХОТНИКОВА І.А. Канд. технічних наук, доцент, Харківський національний університет будівництва та архітектури, м Харків, Україна, e-mail: ira5657@gmail.com, тел. +38 (093) 646-59-33, ORCID: 0000-0003-1986-4215

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ФРАГМЕНТА СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННОЇ МОСТОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ НАГРІВАННІ

АНОТАЦІЯ

Розроблено метод експериментального дослідження моделі фрагмента сталезалізобетонної мостової конструкції, створена випробувальна установка, на якій проведено комплекс досліджень. Отримано діаграми переміщення верхньої поверхні плити, таблиці розподілу температури в залізобетонних елементах моделі фрагмента мостової конструкції, розподілу температури в елементах сталевих балок моделі, розподілу температури в циліндричних анкерах між сталевими балками і залізобетонною плитою. Визначено розподіл температури по перерізу фрагмента після нагрівання, температурні деформації і вплив нагрівання на напруження і деформації конструкції. Вивчено вплив нагрівання на температурні деформації, досліджено виникнення та розвиток температурного моменту, що вигинає. За отриманими даними проведено чисельне дослідження напружено-деформованого стану в лінійній і нелінійній постановці з використанням комп'ютерних технологій "ПК Ліра". У лінійному розрахунку підтверджені основні тенденції поведінки конструкції, що отримані в експерименті. У нелінійному розрахунку виявлені руйнування у вигляді тріщин в сталевих балках і в залізобетонній плиті.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сталезалізобетонні мости, температурний і термомеханічний аналіз, лінійне і нелінійне моделювання, модель, фрагмент, сталезалізобетонна мостова конструкція.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА СТАЛЕЖЕЛЕЗО- БЕТОННОЙ МОСТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ НАГРЕВАНИИ

ФОМИН С. Л.

Д-р. технических наук, проф., Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, e-mail: Sfomin@ukr.net, тел. +38 (097) 350-62-47, ORCID: 0000-0001-9146-0464

ИЗБАШ Ю.М.

Аспирант, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, e-mail: izbash91@gmail.com, тел. +38 (050) 402-99-39, ORCID: 0000-0002-0936-0518

ПЛАХОТНИКОВА И.А.

Канд. технических наук, доцент, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, e-mail: ira5657@gmail.com, тел. +38 (093) 646-59-33, ORCID: 0000-0003-1986-4215

АННОТАЦИЯ

Разработан метод экспериментального исследования моделей фрагментов сталежелезобетонных мостовых конструкций, создана испытательная



установка, на которой проведен комплекс исследований. Получены диаграммы перемещения верхней поверхности плиты, таблицы распределения температуры в железобетонных элементах модели фрагмента мостовой конструкции, распределения температуры в элементах стальных балок модели, распределения температуры в цилиндрических анкерах между стальными балками и железобетонной плитой. Определено распределение температуры по сечению фрагмента после нагрева, температурные деформации и влияние нагрева на напряжения и деформации конструкции. Изучено влияние нагрева на температурные деформации, исследовано возникновение и развитие температурного изгибающего момента. По полученным данным проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния в линейной и нелинейной постановке с использованием компьютерных технологий "ПК Лира". В линейном расчете подтверждены основные тенденции поведения конструкции, полученные в эксперименте. В нелинейном расчете выявлены разрушения в виде трещин в стальных балках и в железобетонной плите.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сталежелезобетонные мосты, температурный и термомеханический анализ, линейное и нелинейное моделирование, модель, фрагмент, сталежелезобетонная мостовая конструкция.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE MODEL OF COMPOSITE BRIDGE STRUCTURE FRAGMENT AT ELEVATED TEMPERATURES

FOMIN S.L. Dr., Prof., Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, e-mail: Sfomin@ukr.net, tel. +38 (097) 350-62-47, ORCID: 0000-0001-9146-0464

IZBASH YU.M. PG student, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, e-mail: izbash91@gmail.com, tel. +38 (050) 402-99-39, ORCID: 0000-0002-0936-0518

ПЛАНОТНИКОВА І.А. PhD, Ass. Prof., Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, e-mail: ira5657@gmail.com, tel. +38 (093) 646-59-33, ORCID: 0000-0003-1986-4215

ABSTRACT

Our group from Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture (KNUCEA) conducts research on fire resistance of composite bridges according to Eurocodes and national regulations.

The purpose of experimental studies is to identify the specifics of behaviour of composite steel-concrete

structures of bridge long-span elements at elevated temperatures.

Revision of international data showed that practically in many countries of the world there is no building codes and international fire safety standards that regulate fire protection rules on design of composite bridges. Moreover, there is no determination of the main aspects of their fire safety.

Most common and especially dangerous for the bridges are hydrocarbon fires which temperature can reach and exceed 1000 °C after only several minutes after ignition. Furthermore, no attention paid to the question of passive fire protection of such structures at elevated temperature.

Analytical analysis, as usual, does not take into account the features of the physical and mechanical characteristics of materials in the fire environment: modulus of elasticity, maximal deformations, and complete diagrams of concrete and reinforcement deformation. New method of analysis is developing now by our group.

The results of studies gave us stress-strain state of structures modelled with "PC LIRA" in linear and nonlinear formulations, with consideration of the features of composite steel-concrete structures and their passive protection. The defects of strength and deformation properties of concrete at higher temperature given in EN 1994-1-2:2005 were found, which were reflected in the national standard DSTU-N-P B V.2.6-159:2010 in the course of harmonization. A methodology was developed for determining revised " $\sigma_c, \theta - \epsilon_c, \theta$ " charts for the design of composite steel and concrete structures during a fire. Diagram parameter values were adjusted for concretes based on silicate filler at high temperatures, the mathematical stress-strain model of the concrete under compression and high temperatures was specified.

A new technique for experimental studies, an experimental installation and samples of reinforced concrete and composite beams have been developed.

KEY WORDS: composite bridges, temperature and thermomechanical analysis, linear and nonlinear modeling, model, fragment, composite bridge structure.

ВСТУПЛЕНИЕ

По данным Министерства инфраструктуры Украины [1] всего в стране насчитывается 17 тыс. мостов, из них 4 тыс. требуют неотложного ремонта, 9 тыс. находятся в аварийном состоянии. При этом многие мосты обрушаются вследствие пожаров. Вопросы обеспечения пожарной безопасности мостовых сооружений (далее - мостов) в последнее время становятся все более актуальными.

В мостостроении широко применяются пролетные стальные балки, которые работают совместно с железобетонным покрытием. Сталежелезобетонные конструкции являются



более надежными по сравнению с другими решениями. В этих конструкциях соединение стальных балок с железобетонными покрытиями осуществляют с помощью специальных анкеров. Их применяют также при реконструкции и усилении мостов.

АНАЛИЗ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенный анализ показывает следующее:

- во многих странах мира на данный момент отсутствуют строительные нормы и правила, а также нормы пожарной безопасности, регламентирующие вопросы противопожарной защиты сталежелезобетонных мостовых конструкций и определяющие основные аспекты комплекса их пожарной безопасности [2];
- особенно опасны углеводородные пожары, температура которых может достигать и превышать 1000°C в течение нескольких минут после воспламенения [3 - 7];
- не уделяют внимания данной проблеме и при разработке наиболее опасных фрагментов мостовых конструкций, требующих пассивной противопожарной защиты;
- при аналитическом анализе, как правило, не учитывают особенности физико-механических характеристик материалов в условиях пожарной среды: модулей упругости, максимальных и предельных деформаций, полных диаграмм деформирования бетона и арматуры [8 - 11];
- отсутствует метод экспериментальных исследований мостовых конструкций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В Харьковском национальном университете строительства и архитектуры проводятся исследования по обеспечению огнестойкости сталежелезобетонных мостовых конструкций с учетом Еврокодов.

Напряженно-деформированное состояние конструкций моделируется на ПК Лира в линейной и нелинейной постановках с учетом особенностей сталежелезобетонных конструкций. Выявлены недостатки приведенных в EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4 прочностных и деформационных свойств бетона при повышенных температурах, которые в процессе гармонизации отразились в национальном стандарте ДСТУ-Н-П Б В.2.6-159:2010 [12]. Разработан метод определения уточненных диаграмм « $\sigma_{c,\theta}$ – $\varepsilon_{c,\theta}$ » для проектирования сталежелезобетонных конструкций во время пожара. Уточнена математическая модель соотношения "напряжение-деформации" бетона при сжатии и повышенных температурах.

Разработан новый метод экспериментальных исследований, опытная установка и образцы железобетонных и сталежелезобетонных балок.

МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью экспериментальных исследований является выявление особенностей работы модели фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции при нагреве.

Задачи исследования включали:

- определение характера распределения температуры в сечениях стальных и железобетонных фрагментов сталежелезобетонной мостовой конструкции;
- определение характера деформирования сталежелезобетонной мостовой конструкции при нагреве, при статической нагрузке и при совместном воздействии температуры и нагрузки для различных условиях опирания;
- определение влияния температурных моментов на перераспределение усилий в конструкции;
- изучение характера образования и развития пластических шарниров в опорных и пролетных сечениях в процессе нагрева и трещинообразования бетонной секции;
- исследование снижения прочности при интенсивном высокотемпературном нагреве опорных и пролетных сечений.

В качестве объекта исследований выбрана сталежелезобетонная трехпролетная мостовая конструкция при статической нагрузке и нагреве снизу среднего пролета. Прототипом исследуемой конструкции является сталежелезобетонный мост в Окленде, Сан-Франциско, штат Калифорния, США - BayBridge [13]. Его обрушение произошло из-за аварии движущегося бензовоза, который разбился и загорелся на южном соединении автострад I-80 с I-880 под I-580. Из-за пожара, два пролета моста I-580 обрушились (рис. 1).

Модель фрагмента мостовой конструкции состоит из двух стальных балок длиной 2500 мм из прокатных двутавров серии 2062 высотой $H = 200$ мм, шириной верхней и нижней полок 100 мм, толщиной $T_f = 8,6$ мм, стенки толщиной $T_w = 5,2$ мм, площадью поперечного сечения 27,7 мм. Балки расположены на расстоянии 600 мм в осях друг от друга и объединены с железобетонной плитой размерами 2500 мм длиной, 1200 мм шириной и 100 мм толщи-



Рис. 1. Обрушение моста BayBridge после пожара [3]



ной. Объединение осуществлено с помощью 17 анкеров фирмы Nelson. Для бетонирования в заводских условиях балки собраны в блок посредством установки четырех стальных диафрагм сверху и двух растяжек снизу (рис. 2, 3а). Для предотвращения потери устойчивости в поперечном направлении балки снабжены вваренными стальными пластинами толщиной 4 мм.

Для испытания разработана и изготовлена специальная установка, которая позволяет осуществлять нагрузку и нагрев образцов. Конструктивная схема установки состоит из сталежелезобетонной балочной плиты, средняя часть которой длиной 1200 мм имеет две нижние опоры и загружается равномерно распределенной нагрузкой, нижняя часть подвергается нагреванию. Две крайние консольные части длиной по 650 мм непосредственно не нагреваются и в некоторых вариантах имеют одностороннюю крайнюю верхнюю опору в виде траверсы и тяжей с форкопфами (динамометрами), позволяющими определить величину реакции на опоре, при этом балочная плита становится статически неопределимой (рис. 3б).

В состав установки входит электрическая печь, распределительная система траверс, домкрат, измерительные приборы, термопары, вторичное устройства для замера температур (рис. 4). Размещение измерительных приборов, термопар, вторичного устройства для замера температур показано на рис. 5, 6.



Рис. 2. Блок стальных балок

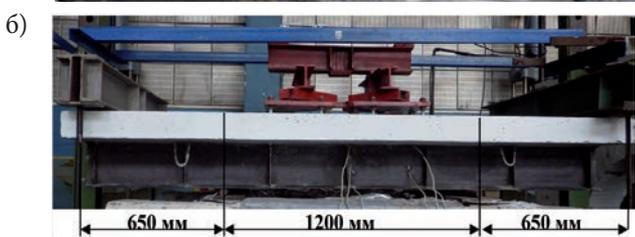


Рис. 3. Модель фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции (а); трехпролетная сталежелезобетонная балочная плита (б)

Равномерно распределенная нагрузка моделировалась приложением ее в 16 точках с помощью 50-ти тонного домкрата и распределительной системой траверс из треугольных стальных элементов, обеспечивающих точность ее приложения нагрузки при любых деформациях плиты. Система траверс, моделирующая распределенную нагрузку, приведена на рис. 6.

Материалы. Применен тяжелый бетон класса С25/30: расчетная цилиндрическая прочность бетона на сжатие $f_{cd} = 17$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$; предельные деформации $\varepsilon_{(c)} = -0,00328$ и $\varepsilon_{(t)} = 0,00164$; объемный вес $R = 0,025$ МН/м³;



Рис. 4. Общий вид установки для испытания модели фрагмента моста при нагреве



Рис. 5. Размещение измерительных приборов, термопар, вторичного устройства для замера температур



Рис. 6. Система траверс для моделирования равномерно распределенной нагрузки



модуль упругости $E = 32500$ МПа; максимальные напряжения $\sigma_{(-)} = -17$ МПа и $\sigma_{(+)} = 27$ МПа.

Арматура в плите. Продольная диаметром - $\varnothing 10$ мм, шаг стержней 100 мм, А400. Поперечная арматура - $\varnothing 10$ мм, шаг стержней 200 мм, А400.

Прокатный профиль в балках. Двутавр из стали класса S 235; предел прочности стали на разрыв $f_v = 235$ Н/мм²; объёмный вес $R_o = 0,0785$ кН/м³; модуль упругости $E = 210000$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; предельные деформации $\varepsilon_n = 0,00112$ и $\varepsilon_c = 0,0168$.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ МОСТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ НАГРЕВАНИИ СНИЗУ

При исследовании сталежелезобетонной фрагментов мостов стальные секции не имели защитного покрытия от огневого воздействия. Испытания проводились в следующей последовательности.

1 ВАРИАНТ - нагрев среднего пролета снизу трехпролетной неразрезной сталежелезобетонной плиты на двух средних опорах. Целью было исследование распределения температуры по сечению стальных секций и железобетонной плиты комбинированной конструкции фрагмента, температурных деформаций балок при незакрепленных крайних опорах. В данном варианте неразрезная плита становилась разрезной в связи с отсутствием верхних опор, - при нагревании крайние ее части поднимались.

2 ВАРИАНТ - нагрузка среднего пролета 16-ю симметрично расположенными сосредоточенными силами P этапами до суммарной нагрузки $\Sigma P = 16$ т, затем нагрев со стороны нижней границы до температуры 400°C на поверхности стальных балок. Целью было исследование напряженно-деформированного состояния при нагрузке, распределения температуры по сечению фрагмента после сушки при первом нагревании, ее температурных деформаций и влияние нагрева на напряжения и деформации конструкции.

3 ВАРИАНТ - нагрев среднего пролета снизу неразрезных сталежелезобетонных балок при наличии связей с верхними крайними опорами. Целью было исследование влияния нагрева на температурные деформации, возникновение и развитие температурного изгибающего момента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ МОСТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ НАГРЕВАНИИ

В первом варианте проведено исследование распределения температуры по сечению стальной секции и железобетонной плиты модели фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции, температурных деформаций балки при незакрепленных крайних опорах. Нагревание длилось 90 мин с фиксацией информации через каждые 15 мин. Распределение температуры по высоте стальной балки, температуры в анкерах, температуры по высоте железобетонной плиты показано на рис. 7 -10.

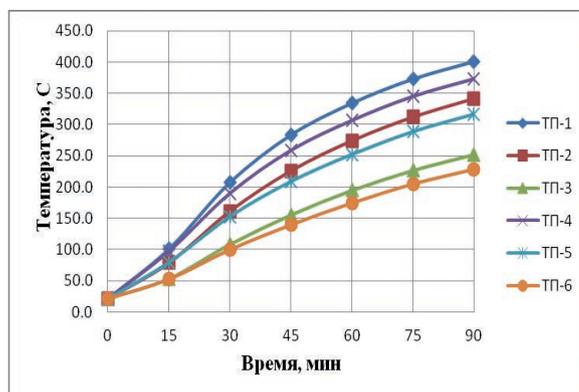


Рис. 7. Распределение температуры по высоте стальной балки 1

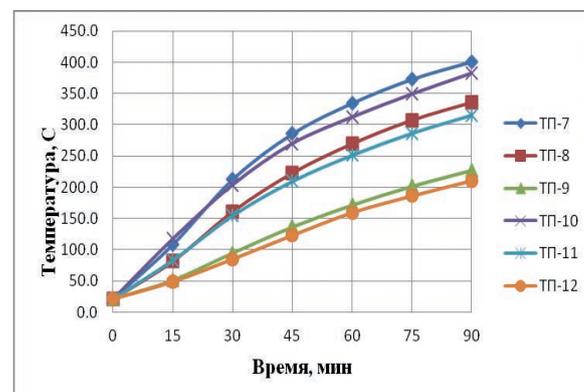


Рис. 8. Распределение температуры по высоте стальной балки 2

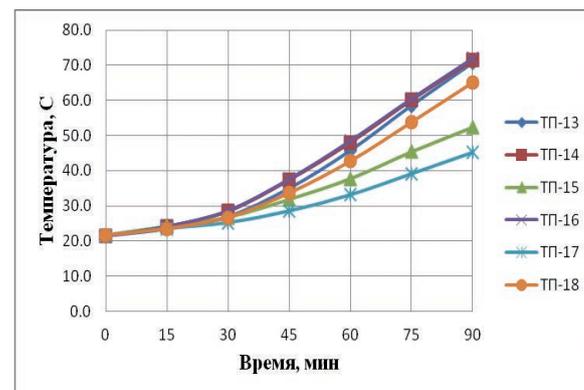


Рис. 9. Распределение температуры в анкерах

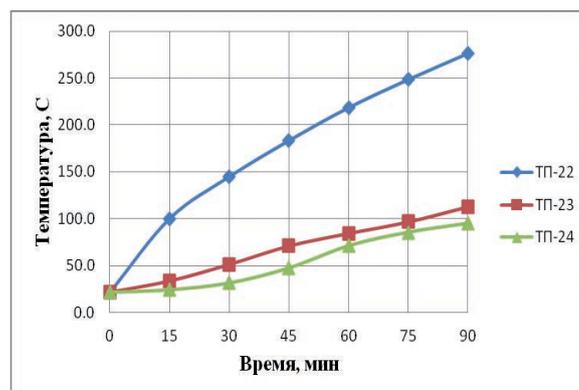


Рис. 10. Распределение температуры по высоте железобетонной плиты



Диаграммы перемещения верхней поверхности плиты представлены на рис. 11.

Получены графики распределения температуры в железобетонных элементах модели фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции, распределения температуры в элементах стальных балок модели, распределения температуры в цилиндрических анкерах между стальными балками и железобетонной плитой.

Во втором варианте поэтапно прикладывали нагрузку в среднем пролете 16-ю сосредоточенными силами P при суммарной нагрузке $\Sigma P = 16$ т, затем производили нагревание со стороны нижней грани до температуры 400°C на поверхности стальных балок. Определено распределение температуры по сечению модели фрагмента после сушки при первом нагреве, ее температурные деформации и влияние нагрева на напряжения и деформации конструкции.

В третьем варианте осуществляли нагревание среднего пролета снизу модели фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции при наличии связей с крайними опорами. Определено влияние нагрева на температурные деформации, исследовано возникновение и развитие температурного изгибающего момента.

По полученным данным проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния в линейной и нелинейной постановках с использованием компьютерных технологий ПК Лира.

ОБЪЕМНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ МОСТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

В основу расчета положен метод конечных элементов в перемещениях. Объемная модель фрагмента моста составлена из 2900 пространственных восьми-узловых изопараметрических элементов типа КЭ36 и имеет 3900 узлов.

Особенностью данной модели является неравномерный шаг сетки конечных элементов, связанный с конструкцией экспериментальной модели, размещением узлов для приложения сосредоточенных усилий и положением стальных балок. Поэтому затруднена процедура образования пространственных конечных элементов путем перемещения образующей. Для каждого последующего слоя требуется

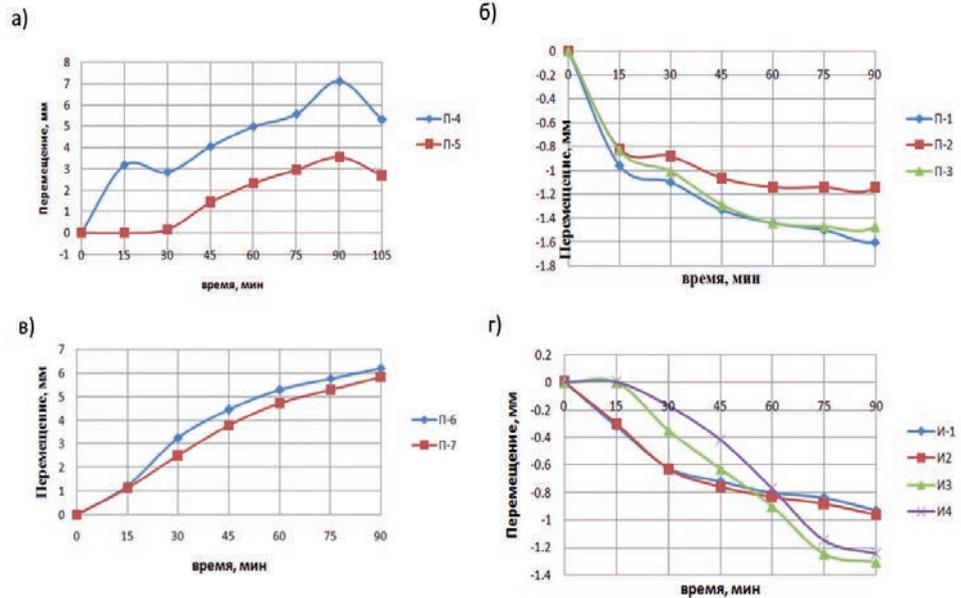


Рис. 11. Перемещения верхней поверхности плиты в процессе прогревания снизу (а, б, в – данные прогибомеров, г – данные индикаторов)

своя образующая (в данном случае пластина), которую требуется своевременно удалять, что приводит к большой громоздкости и требует особой тщательности. На рис. 12 приведена построенная таким способом модель.

ЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ МОСТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Расчет проведен на два нагружения: 1 нагружение – собственный вес модели фрагмента; 2 нагружение - 16 узловых сосредоточенных усилий, моделирующих равномерно распределенное нагружение.

Второе нагружение проведено из условия суммарной нагрузки $\Sigma P = 50$ т, одна шестнадцатая которого составляет узловую нагрузку $P = 31,35$ кН.

Основные результаты КЭ моделирования, отображающие поведение КЭ модели, приведены на рис. 13, 14.

Получены также изополя напряжений по $N_y, N_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$.

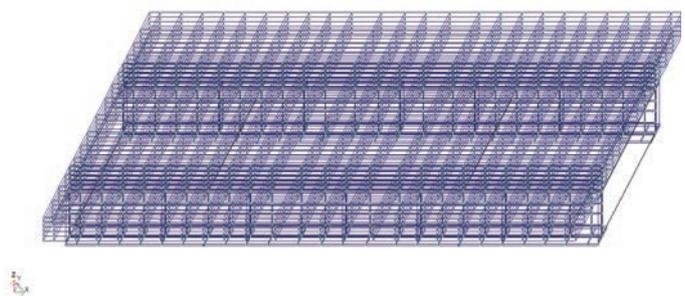


Рис. 12. Расчетная конечно-элементная модель фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции

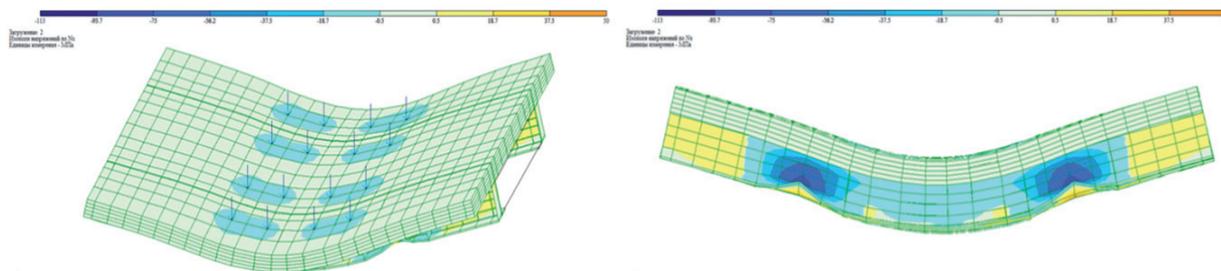


Рис. 13. Изополя напряжений по N_x в модели фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции при действии суммарной нагрузки на плиту 50 т

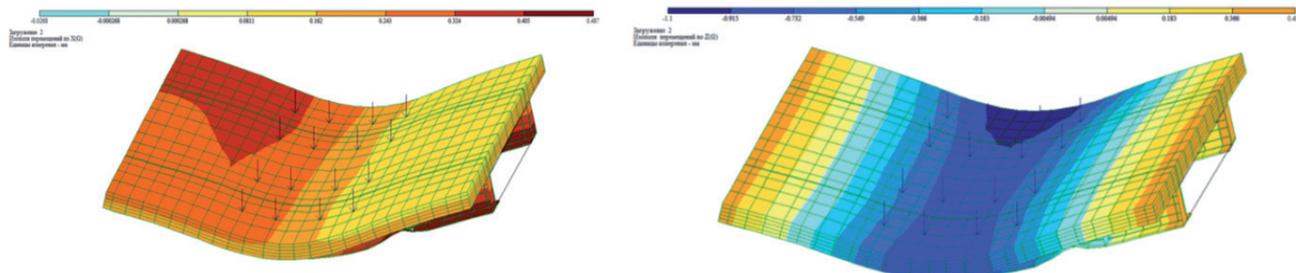


Рис. 14. Изополя перемещений по X и Z в модели фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции при действии суммарной нагрузки на плиту 50 т

При втором нагружении подтверждены основные тенденции поведения конструкции, полученные в эксперименте, описанном выше.

НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ МОСТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Проведена смена конечных элементов с КЭ36 на нелинейный элемент КЭ236 – физически нелинейный универсальный пространственный восьми-узловой изопараметрический. При назначении жесткости КЭ заданы: модуль упругости $E=32500$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, объёмный вес $R=0,025$ МН/м³.

Приняты следующие законы и параметры нелинейности материалов (рис. 15).

Модель фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции рассчитывали на 3 нагружения:

- 1) нагружение – собственный вес модели фрагмента;
- 2) нагружение - 16 узловых сосредоточенных усилий, моделирующих равномерно распределенное нагружение;
- 3) нагружение – температурное воздействие. По результатам эксперимента в каждом конечном элементе задавалось значение средних температур.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ МОСТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ В ПК ЛИРА

При втором локальном нагружении зафиксировано разрушение в виде трещин (рис. 16).

Основные результаты КЭ моделирования, отображающие поведение КЭ модели, приведены на рис. 17 - 18.

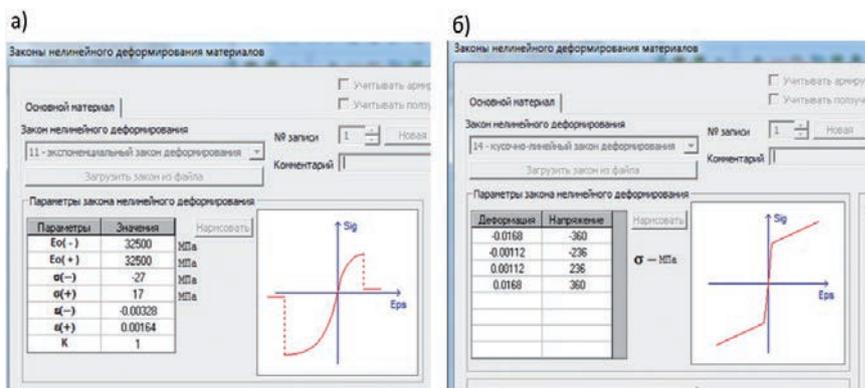


Рис. 15. Законы и параметры нелинейности (а – бетон; б – сталь)

1. Расчетная схема:
 - Уравнений 12642
 - Элементов 2990
 - Узлов 3900
 - Нагружений 3
 2. Расчёт:
 - Шагово-итерационный
 3. Ресурс:
 - Диск.память 31,014 М
 - Время расчета 1-1 мин.

РАЗРУШЕНИЯ:
 ■ Трещины

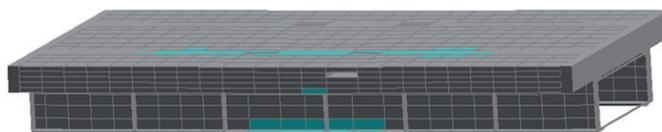


Рис. 16. Образование трещин в моделируемой модели фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции

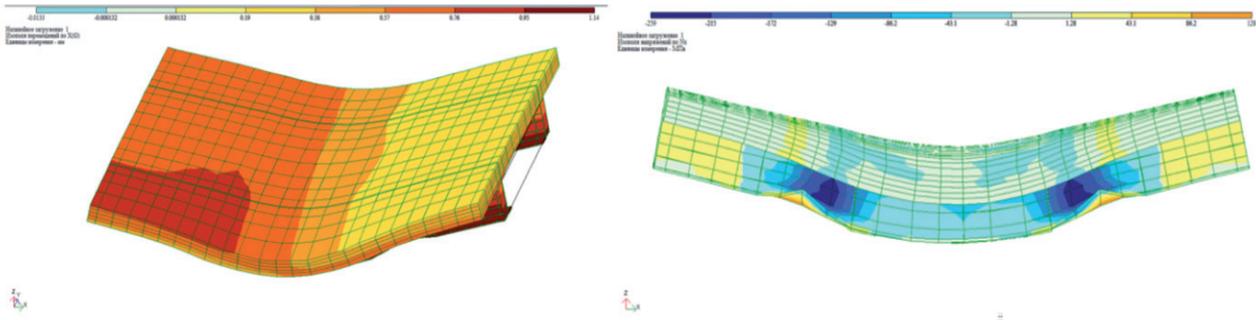


Рис. 17. Изополю перемещений по X и напряжений по N_x в модели фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции при действии суммарной нагрузки на плиту 50 т

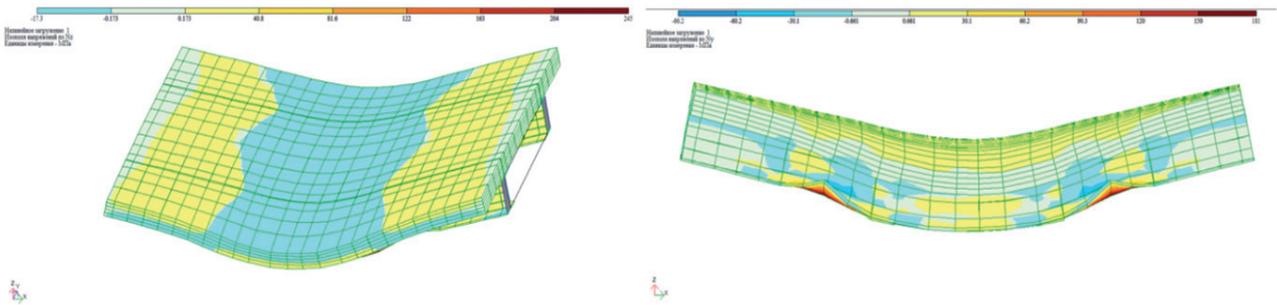


Рис. 18. Изополю напряжений по N_y и N_z в модели фрагмента сталежелезобетонной мостовой конструкции при действии суммарной нагрузки на плиту 50 т

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод экспериментального исследования сталежелезобетонных фрагментов мостов, создана испытательная установка, на которой проведен комплекс исследований.
2. Получены диаграммы распределения температуры по высоте стальной балки, температуры в цилиндрических анкерах между стальными балками и железобетонной плитой, температуры по высоте железобетонной плиты, диаграммы перемещения верхней поверхности плиты, таблицы распределения температуры в железобетонных элементах модели фрагмента моста по термопарам.
3. Определено распределение температуры по сечению фрагмента после сушки при первом нагреве, ее температурные деформации и влияние нагревания на напряжения и деформации конструкции. Изучено влияние нагревания на температурные деформации, исследовано возникновение и развитие температурного изгибающего момента.
4. Выявлено, что максимальная температура нижних граней стальных балок равна 401°C (максимально допустимая), а температура в печи при этом зафиксирована $305,2^{\circ}\text{C}$. Повышенная температура нижних граней балок возникла от воздействия лучистого потока.

5. По полученным данным проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния в линейной и нелинейной постановке с использованием компьютерных технологий ПК Лира. При втором нагружении в линейном расчете подтверждены основные тенденции поведения конструкции, полученные в эксперименте. В нелинейном расчете выявлены разрушения в виде трещин в стальных балках и в железобетонной плите.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ТСН.ua [Электронный ресурс] // <https://ru.tsn.ua/ukrayina/ministr-infrastruktury-ozvuchil-neverooyatnyyu-cifru-avariynyh-mostov-v-ukraine-814603.html> (дата обращения: 01.03.2017)
2. В. Мурашка. Огнезащита мостов: проблемы и выводы. Противопожарные и аварийно-спасательные средства № 4, 2006. – 4 с.
3. Consolazio, G.R., Davidson, M.T. & Getter, D.J. "Vessel crushing and structural collapse relationships for bridge design." Structures Research Report No.72908/74039, Engineering and Industrial Experiment Station (EIES), University of Florida (UF), Gainesville, Florida, 2010. – 35 p.
4. Kodur, V.K., Garlock, M.E. & Iwanikiw, N. "National Workshop on Structures in Fire: State-of-the-Art, Research and Training Needs." Report CEE-RR- 2007/03, National



- Inst. of Standards and Technology (NIST), U.S, 2007. – 852 p.
5. WHAS11 [Электронный ресурс] // <http://www.whas11.com/home/Semi-truck-catches-fire-on-I-71-N-123395278.html> (дата обращения: 07.11.2012).
 6. Stoddard, R. "Inspection and Repair of a Fire Damaged Prestressed Girder Bridge." Report IBC-04-17, Washington State DOT, Olympia, WA, 2004. – 155 p.
 7. Ham, D.B. & Lockwood. "National Needs Assessment for Ensuring Transportation Infrastructure Security." American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C, 2002. – 84 p.
 8. Roberts, J.E., Kulicki, J.M. & Beranek, D.A. "Recommendations for Bridge and Tunnel Security." Report FHWA-IF-03-036. (FHWA)/AASHTO Blue Ribbon Panel, 2003.- 55 p.
 9. Beard, A. & Carvel, R. "The Handbook of Tunnel Fire Safety." Thomas Telford Press, London, 2005. – 22 p.
 10. Payá-Zaforteza, I. & Garlock, M.E. "A 3D Numerical Analysis of a Typical Steel Highway Overpass Bridge Under a Hydrocarbon Fire." Structures in Fire, Proc. of the 6th Intern. Conf., 2010. - 11-18 pp.
 11. Choi, J. "Concurrent Fire Dynamics Models and Thermomechanical Analysis of Steel and Concrete Structures." Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 2008. – 247 p.
 12. С.Л. Фомін, Касем Шейхмус, О.І. Давиденко, В.Г. Поклонський. Міцнісні та деформаційні властивості бетону за підвищених температур сталезалізобетонних конструкцій // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» № 755. Теорія і практика будівництва. – Львів: Вид. - Львівської політехніки, 2013. - 435 – 441 с.
 13. Astaneh-Asl, A., Noble, C.R., Son, J., Wemhoff, A.P., Thomas, M.P. & McMichael, L.D. "Fire Protection of Steel Bridges and the Case of the MacArthur Maze Fire Collapse." TCLEE 2009: Life line Earthquake Engineering in a Multi Hazard Environment, Oakland, CA, June 28th-July 1st, 2009. – 132 p.
- collapse relationships for bridge design." Structures Research Report No.72908/74039, Engineering and Industrial Experiment Station (EIES), University of Florida (UF), Gainesville, Florida, 2010. – 35 c.
4. Kodur, V.K., Garlock, M.E. & Iwanikiw, N. "National Workshop on Structures in Fire: State-of-the-Art, Research and Training Needs." Report CEE-RR- 2007/03, National Institute of Standards and Technology (NIST), U.S, 2007. – 852 p.
 5. WHAS11//<http://www.whas11.com/home/Semi-truck-catches-fire-on-I-71-N-123395278.html> (last accessed: 07.11.2012).
 6. Stoddard, R. "Inspection and Repair of a Fire Damaged Prestressed Girder Bridge." Report IBC-04-17, Washington State DOT, Olympia, WA, 2004. – 155 p.
 7. Ham, D.B. & Lockwood. "National Needs Assessment for Ensuring Transportation Infrastructure Security." American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C, 2002. – 84 p.
 8. Roberts, J.E., Kulicki, J.M. & Beranek, D.A. "Recommendations for Bridge and Tunnel Security." Report FHWA-IF-03-036. (FHWA)/AASHTO Blue Ribbon Panel, 2003.- 55 p.
 9. Beard, A. & Carvel, R. "The Handbook of Tunnel Fire Safety." Thomas Telford Press, London, 2005. – 22 p.
 10. Payá-Zaforteza, I. & Garlock, M.E. "A 3D Numerical Analysis of a Typical Steel Highway Overpass Bridge Under a Hydrocarbon Fire." Structures in Fire, Proc. of the Sixth International Conference, 2010. - 11-18 pp.
 11. Choi, J. "Concurrent Fire Dynamics Models and Thermomechanical Analysis of Steel and Concrete Structures." Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 2008. – 247 p.
 12. S.L. Fomin, Kasem Sheyhmus, O.I. Davidenko, V.G. Poklonskiy. Mitsnisi ta deformatsiyni vlastivosti betonu za pidvischenih temperatur stalezalizobetonnih konstruktsiy // Visnik Natsionalnogo universitetu «Lvivska politehnika» # 755. Teoriya i praktika budivnitstva. – Lviv: Vidavnitstvo Lvivskoyi Politehniki, 2013. - 435 – 441 pp.
 13. Astaneh-Asl, A., Noble, C.R., Son, J., Wemhoff, A.P., Thomas, M.P. & McMichael, L.D. "Fire Protection of Steel Bridges and the Case of the MacArthur Maze Fire Collapse." TCLEE 2009: Life line Earthquake Engineering in a Multi Hazard Environment, Oakland, CA, June 28th-July 1st, 2009. – 132 p.

REFERENCES

1. TSN.ua // <https://ru.tsn.ua/ukrayina/ministr-infrastruktury-ozvuchil-neveroyatnyuyu-cifru-avariynyh-mostov-v-ukraine-814603.html> (last accessed: 01.03.2017)
2. V. Murashka. Oгнеzaschita mostov: problemy i vyivodyi. Protivopozharniye i avariynospasatelnyye sredstva #4, 2006. – 4 p.
3. Consolazio, G.R., Davidson, M.T. & Getter, D.J. "Vessel crushing and structural

Стаття надійшла до редакції 05.09.2017р.