

Список использованных источников

1. HYDROMATIC GmbH (Германия).
2. Дегремон. Технический справочник по обработке воды : в 2 т. : пер. с фр. – СПб. : Новый журнал, 2007.
3. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы : пер. с англ. / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван. – М. : Мир, 2004. – 480 с.
4. Литманова, Н. Л. Совершенствование технологии локальной очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.04 / Наталия Леонидовна Литманова. – Санкт-Петербург, 2007. – 17 с.
5. Исследование биологической очистки сточных вод молокозаводов на модельном стоке / С. В. Степанов, О. С. Солкина, К. М. Морозова [и др.] // Технологии очистки воды «Техновод-2016»: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – 2016. – С. 210–215.

УДК 699.841

ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ В ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ СДВИГОВОГО ТИПА

Магистрант Ш. А. Эшонхужаева

*Научный руководитель – Е. А. Мойсейчик, д. т. н., проф. кафедры
“Мосты и тоннели”, Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь, e-mail: mit_ftk@bntu.by*

Реферат

На основании анализа литературных источников показано, что стальные энергопоглоители, использующие работу активных элементов в упругопластической и пластической стадиях работы, могут быть применены для защиты массивных мостовых сооружений. В статье предложены места расположения упругопластических стальных энергопоглоителей в пролетных мостовых конструкциях и показана их энергетическая эффективность. Экспериментально, с использованием лабораторных образцов из малоуглеродистой пластичной стали доказано, что в окрестности конструктивно-технологических дефектов (отверстия, вырезы) в растянутых и сдвигаемых элементах конструкций ЭП происходит локализация деформаций, особенно при упруго-пластической и пластической стадиях работы стали, с повышением средней температуры поверхности стали при деформировании на несколько десятков градусов (до 90 °С), что позволяет в режиме мониторинга по температурному полю активного элемента контролировать работоспособность элементов стальных пролетных сооружений мостов и энергопоглоителей.

Ключевые слова: сейсмостойкость, энергопоглоители, деформации сдвига, энергоемкость, теплообразование.

Введение

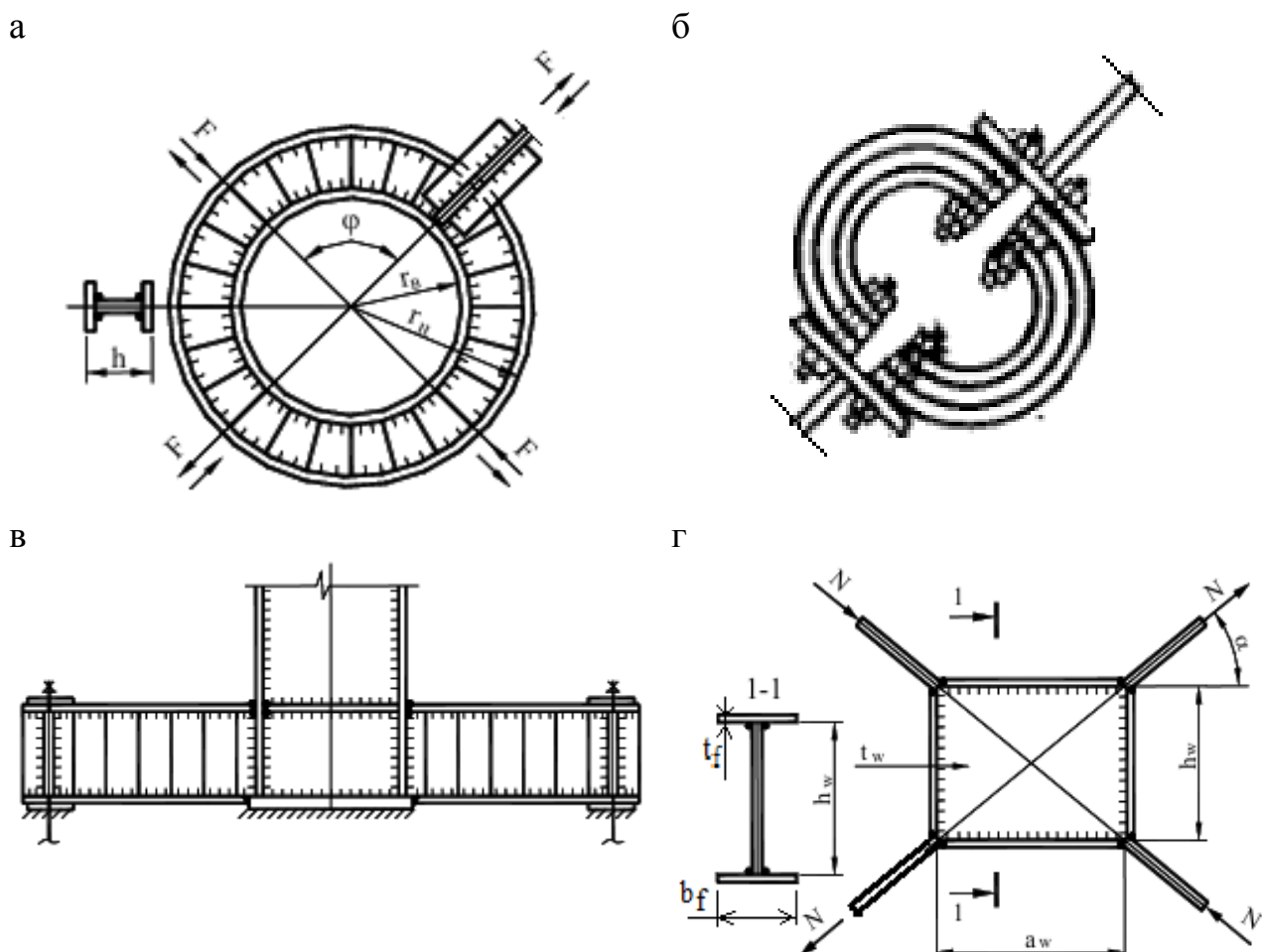
Территория Узбекистана подвержена воздействию разрушительных землетрясений, которые происходили в глубокой древности и возникали относительно недавно [1]. Землетрясения интенсивностью более семи баллов приводили к заметным нарушениям работоспособности искусственных сооружений на железных и автомобильных дорогах. Особенно это проявляется для массивных конструкций, на элементы которых действуют большие инерционные силы при сейсмических воздействиях. Повреждения опор, железобетонных и сталежелезобетонных балок мостов возникают, в основном, в опорных и пролетных строениях и проявляются в трещинообразовании, смещениях, осадках и разрушении опор; разрушении опорных частей пролетных строений, смещении и падении пролетных строений, разрушении соединительных элементов и др. [2]. Повышения устойчивости положения пролетных строений мостовых конструкций при землетрясениях достигают устройством различных ограничителей перемещений вдоль и поперек осей сооружения, специальных антисейсмических устройств, не допускающих раскрытия деформационных швов и др. [2]. Снижения названных повреждений можно достичь установкой демпфирующих устройств в сопряжениях между опорами мостов и пролетными балками. Демпферы поглощают энергию сейсмических ударов, снижают передающиеся на пролетные конструкции сейсмические ускорения [4–9]. Такие энергопоглощающие устройства разработаны для сооружений различной массы [5, 6]. Сейсмопоглотители, активные элементы которых выполнены из пластичной стали, используют работу материала в упруго-пластической и пластической стадии и надежно обеспечивают работоспособность массивных зданий и сооружений (многоэтажные жилые и производственные здания, различные сооружения) [6, 7]. Энергопоглощающие элементы в зданиях и сооружениях в каждом полупериоде колебаний преобразуют механическую энергию землетрясения, передающуюся на строительные конструкции, в другие виды энергии (в основном, тепловую) и предотвращают разрушения основных несущих конструкций при возможных пиковых перегрузках во время землетрясений. Поглощенная энергия преобразуется в тепловую и отводится в окружающую среду. Температура стальных активных элементов, преобразующих механическую энергию в тепловую, достигает 120–150 °C [9].

Энергопоглотители этого типа могут быть применены для защиты массивных мостовых сооружений. В настоящей статье рассмотрим схемы применения упругопластических стальных энергопоглотителей в пролетных мостовых конструкциях и их энергетическую эффективность.

Основная часть

Классификацию энергопоглотителей (далее – ЭП) производят исходя из физических принципов работы сейсмозащиты сооружений, конструктивных особенностей поглотителей сейсмической энергии, материала и стадии его деформирования, сопряжения энергопоглотителей с защищаемым сооружением и др. [5]. В качестве активных поглотителей энергии используются демпферы различных принципов действия, адаптивные системы, системы с гасителями колебаний, сейсмические экраны, завесы и др.

Простыми по конструкции, надежными в работе и обладающими высокими демпфирующими свойствами являются поглотители сейсмической энергии, принцип действия которых основан на повторно-переменном упругопластическом деформировании низкоуглеродистой стали (рисунок 1). Их эффективность доказана более чем полувековой надежной работой многоэтажных зданий и промышленных сооружений с ЭП в Казахстане, других государствах Средней Азии [5, 6]. Такие ЭП приспособлены для изготовления на заводах металлических, в т. ч. мостовых конструкций.



а – кольцевой; б – трубчатый; в – балочный; г – сдвиговой
Рисунок 1 – Упругопластические энергопоглотители [9]

Однако в мостах, расположенных в сейсмоопасных районах, эти ЭП не применялись. Проектирование таких ЭП может выполняться по действующим нормам Республики Казахстан [9, 10].

Основные типы упругопластических ЭП представлены на рисунке 2.

Рассмотрим особенности проектирования ЭП сдвигового типа (далее – ЭПС) [6]. Активным элементом ЭПС, воспринимающим и преобразующим сейсмическую энергию, является стенка. Ее требуемая площадь поперечного сечения определяется из условий работы на сдвиг:

$$A_w = \frac{T_w}{0,5\sigma_{\text{ты}}}, \quad (1)$$

где $T_w = 2N\cos\alpha - \frac{\sigma_{\text{ты}}b_f t_f^2}{h_w}$ – усилие, сдвигающее стенку ЭПС вдоль горизонтальной оси;

N – усилие, действующее на ЭПС (рисунок 2г);

$\sigma_{\text{ты}} = 1,4R_y$, R_y – расчетное сопротивление стали.

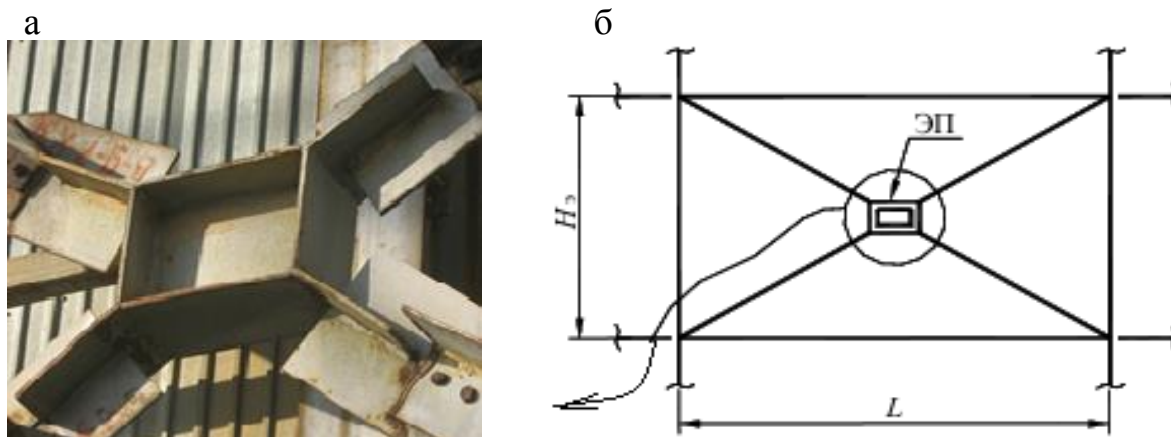


Рисунок 2 – Вид энергопоглотителя сдвигового типа, установленного в связевую систему многоэтажного здания [9]

Окончательно толщину стенки назначают из условия обеспечения ее местной устойчивости не менее $1/30 h_w$.

Толщину t_f каждой из четырех пластин, передающих сдвиговые усилия на активный элемент толщиной t_w , назначают из условия прочности:

$$t_f = N\cos\alpha / (b_f 0,8\sigma_{\text{ты}}), \quad (2)$$

где 0,8 – коэффициент условий работы.

Эффективность поглощения энергии землетрясений ЭП, работающих в упругопластической стадии на переменные нагрузки от землетрясений. Опыт эксплуатации многоэтажных зданий со стальным каркасом в сейсмоопасных районах показал, что за период эксплуатации они воспринимают около 80 циклов знакопеременных сейсмических нагрузок [6]. Сравнить энергоемкость различных ЭП при знакопеременных нагрузках можно по удельной энергопоглощающей способности $W_{\text{ц}}$. В качестве критерия Г. М. Остриковым предложено рассматривать поглощающую способность единицы массы активного элемента ЭП, «определенную при одинаковом уровне максимальных относительных деформаций материала за пределом упругости» и отнесенную к одному циклу переменной нагрузки [6].

Поглощенная при пластическом деформировании активного элемента удельная энергия $W_{\text{ц}}$ определяется работой внутренних напряжений на соответствующих пластических деформациях. В работе [6] предложены формулы для

расчета удельной энергии $W_{ц}$, поглощаемой активным пластинчатым элементом ЭП за один цикл жесткого нагружения при его работе:

– на растяжение
$$W_{цр} \approx 2\sigma_{ту}^2(e - 1)/E\gamma; \quad (3)$$

– на изгиб
$$W_{цр} \approx 1,15\sigma_{ту}^2(e - 1)^2/eE\gamma; \quad (4)$$

– сдвиг
$$W_{цр} \approx 1,73\sigma_{ту}^2(e - 1)/E\gamma, \quad (5)$$

где $e = \varepsilon/\varepsilon_T$ – уровень пластического деформирования; γ – угол сдвига.

При выводе формул предполагалось, что активные элементы ЭП не содержат концентраторов деформаций, а пластические деформации определяются условием пластичности Генки-Мизеса.

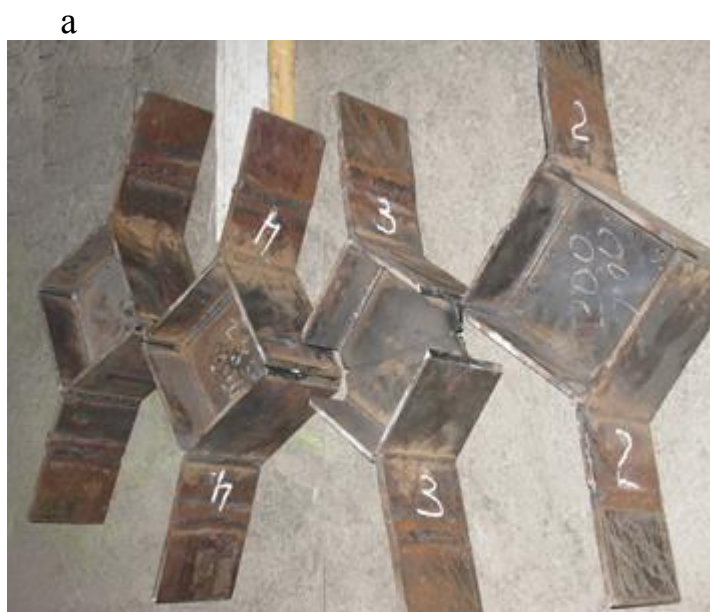
Из зависимостей (3) – (5) следует, что наибольшей удельной энергоемкостью обладают активные элементы ЭП, выполненные из пластичных сталей ВСт3сп5, 09Г2С и подверженные в процессе работы деформациям растяжения-сжатия и сдвига. Применение их в мостовых конструкциях для повышения сейсмостойкости пролетных строений мостов и зон их сопряжений с опорами требует соответствующей доработки конструктивных форм ЭП и дополнительных исследований их работы.

Поля температур поверхности образцов ЭПС. Общие виды образцов ЭПС показаны на рисунке 3а. Размеры образцов – 220×220 мм, толщина листов – 10 мм. Материал – ВСт3пс6. Нагружение производилось в испытательной машине Р-100 с записью диаграммы «нагрузка – удлинение» квазистатически, растягивающим усилием до разрушения. Испытания и обработка данных выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. Процесс деформирования образцов отображался в термофильмах с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000», а обработка результатов велась программным пакетом IRTIS.

Машинные диаграммы деформирования образцов ЭПС представлены на рисунке 4. Кадры термофильма образца без конструктивных дефектов в стенке приведены на рисунке 5, из которого следует, что температурное поле в упругой стадии работы материала стенки равномерное, без аномалий. Также нет аномалий при работе материала стенки в пластической стадии. В стадии самоупрочнения металла неоднородность появляется при образовании волны в стенке (рисунок 3б).

В образцах с конструктивными дефектами (отверстия, вырезы) температурные аномалии проявляются при переходе от упругой работы стали к упруго-пластической и сопровождаются непрерывным ростом температуры в месте зарождения и развития трещины.

Возможное расположение ЭП в мостовых балочных сооружениях. Предполагаем, что устои моста и промежуточные опоры выполнены в соответствии с требованиями норм проектирования сейсмостойких мостов. Тогда энергопоглотители целесообразно устанавливать в местах сопряжений пролетных строений с опорами, конструкций пролетных строений между собой.



а – образцы ЭПС перед испытанием; б – вид образца типа ЭПС с активным элементом без конструктивных концентраторов; в – вид образца типа ЭПС с отверстием в середине активного элемента; г – вид образца типа ЭПС с боковыми вырезами в активном элементе

Рисунок 3 – Экспериментальные энергопоглотители ЭПС и их вид в стадии предразрушения

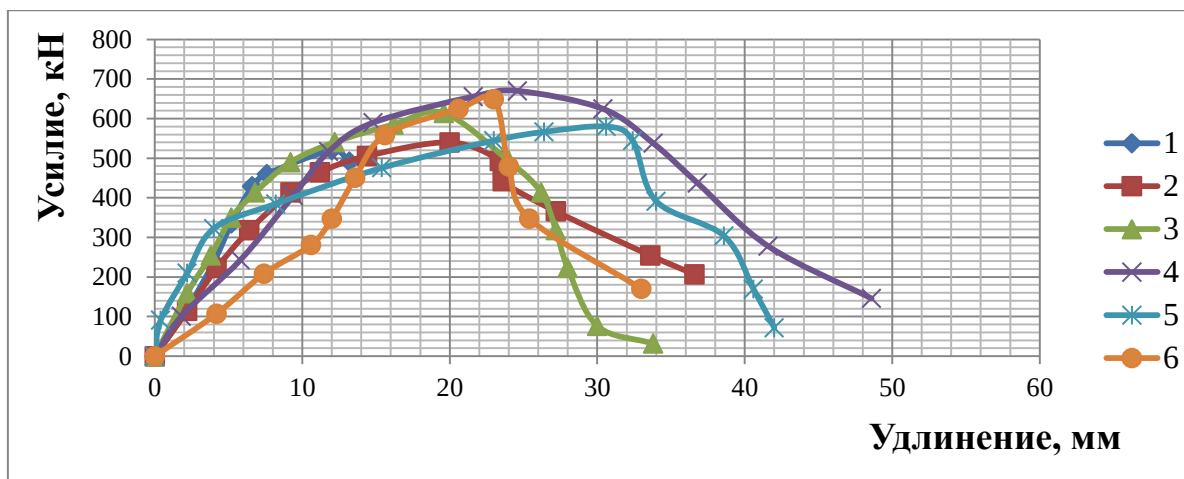
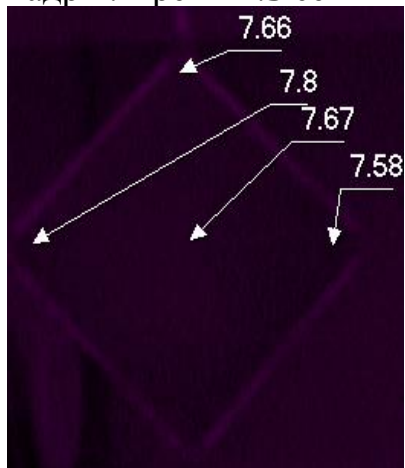
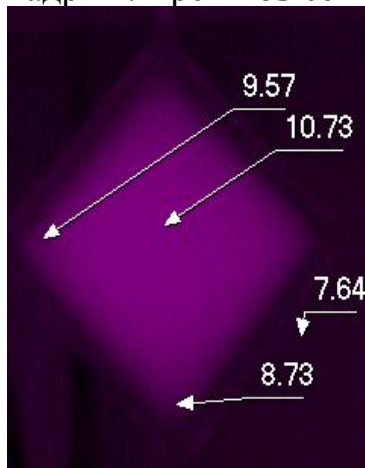


Рисунок 4 – Диаграммы «усилие – удлинение» по данным растяжения экспериментальных сдвиговых образцов с конструктивными дефектами и без них в машине Р-100

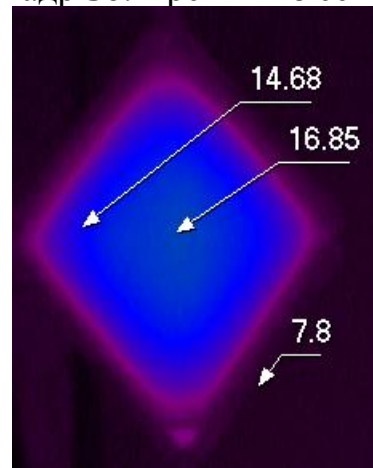
Кадр 1. Время 2.3 сек



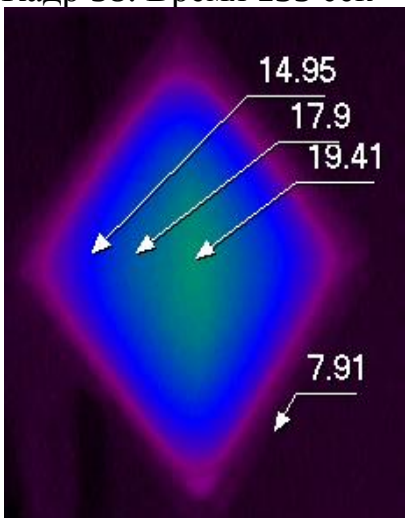
Кадр 27. Время 63 сек



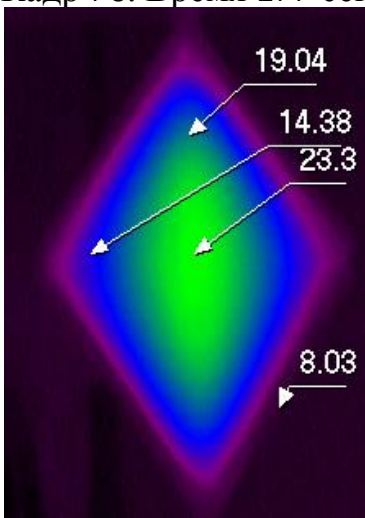
Кадр 50. Время 116 сек



Кадр 58. Время 135 сек



Кадр 76. Время 177 сек



Кадр 110. Время 256 сек

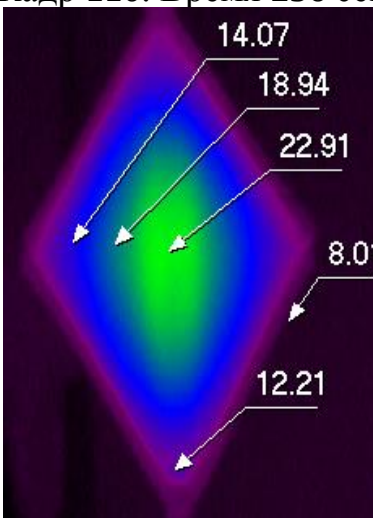


Рисунок 5 – Кадры термофильма деформационного нагрева образца без дефектов в стенке

Заключение

1. На основании опыта строительства и эксплуатации многоэтажных сейсмостойких зданий, оснащенных энергопоглотителями с активными стальными элементами, работающими в упругопластической и пластической стадиях, предложено отдельные из них (ЭПС и др.) применять для повышения сейсмостойкости пролетных строений мостов и зон их сопряжений с опорами с соответствующей доработкой конструктивных форм ЭП и дополнительными исследованиями их работы.

2. Экспериментально, с использованием лабораторных образцов из малоуглеродистой пластичной стали доказано, что в окрестности конструктивно-технологических дефектов (отверстия, вырезы) в растянутых и сдвигаемых элементах конструкций ЭП происходит локализация деформаций, особенно при упруго-пластической и пластической стадиях работы стали, с повышением средней температуры поверхности стали при деформировании на несколько десятков градусов, что позволяет в режиме мониторинга по температурному полю активного элемента контролировать работоспособность элементов стальных пролетных сооружений мостов и энергопоглотителей.

Список использованных источников

1. Газлийские землетрясения 1976 г. Геолого-геофизическая природа очагов. – М. : Наука, 1984. – 200 с.
2. Шестоперов, Г. С. Сейсмостойкость мостов / Г. С. Шестоперов. – М. : Транспорт, 1984. – 143 с.
3. Гельфер, А. А. Разрушение мостовых опор и меры их защиты / А. А. Гельфер. – М. : Изд-во НКХ РСФСР. 1938 – 150 с.
4. Шермухамедов, У. З. Гашение продольных сейсмических колебаний опор балочных мостов с сейсмоизолирующими опорными частями: автореф. дисс...канд. техн. наук: 05.23.11 / У. З. Шермухамедов / ФГОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения». – М., 2010. – 21 с.
5. Мартынов, Н. В. Активная сейсмозащита: варианты развития и критический анализ практических возможностей : монография / Н. В. Мартынов. – Симферополь : [б. и.], 2013. – 267 с.
6. Остриков, Г. М. Стальные сейсмостойкие каркасы многоэтажных зданий: монография / Г. М. Остриков, Ю. С. Максимов. – Алма-Ата : Казахстан, 1985. – 120 с.
7. Строительные нормы. Пособие по расчету и конструированию стальных сейсмостойких каркасов многоэтажных зданий в развитие СНиП РК 2.03-04-2001. Часть 2. – Приняты и введены в действие МИТ РК от 03.11.2004 г. № 426 с 1 марта 2005 г. – Алматы : ТОО «Институт Проектстальконструкция», 2005. – 52 с.
8. Поляков, В. С. Современные методы сейсмозащиты зданий / В. С. Поляков, Л. Ш. Килимник, А. В. Черкашин. – М. : Стройиздат, 1989. – 320 с.
9. Проектирование сейсмостойких зданий. Часть 1. Проектирование зданий из стальных конструкций. НТП РК 08-01.5-2013. – Астана, 2024. – 251 с.
10. Нормативно-техническое пособие Республики Казахстан. Проектирование стальных конструкций. Часть: стальные мосты. НТП РК-03-02.1-2012 (к СН РК EN 1993-2:2006/2011). – Астана, 2015. – 152 с.