

УДК 699.841

DOI 10.52928/2070-1683-2025-41-2-42-47

ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ В ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ СДВИГОВОГО ТИПА

Е.А. МОЙСЕЙЧИК, Ш.А. ЭШОНХУЖАЕВА*(Белорусский национальный технический университет, Минск)**mit_ftk@bntu.by*

На основании анализа литературных источников показано, что стальные энергопоглотители, использующие активные элементы в упругопластической и пластической стадиях работы, могут быть применены для защиты массивных мостовых сооружений. В статье предложены места расположения упругопластических стальных энергопоглотителей 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°C), что позволяет в режиме мониторинга по температурному полю активного элемента контролировать работоспособность элементов стальных пролетных сооружений мостов и энергопоглотителей.

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

Введение. Территория Узбекистана подвержена воздействию разрушительных землетрясений, которые происходили как в глубокой древности, так и относительно недавно [1]. Землетрясения интенсивностью более 7 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. [2–4]. 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. [2–4]. 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 [5–7]. Такие энергопоглощающие устройства разработаны для сооружений различной массы¹. Сеймопоглотители, 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)². Энергопоглощающие элементы в зданиях и сооружениях в каждом полуцикле 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^{3,4}. 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. Сведения об упругопластических энергопоглотителях. Энергопоглотители (далее – ЭП) классифицируются исходя из физических принципов работы сейсмозащиты сооружений, конструктивных особенностей поглотителей сейсмической энергии, материала и стадии его деформирования, сопряжения энергопоглотителей с защищаемым сооружением и др. [5–7]. В качестве активных поглотителей энергии используются демпферы различных принципов действия, адаптивные системы, системы с гасителями колебаний, сейсмические экраны, завесы и др.

¹ Строительные нормы. Пособие по расчету и конструированию стальных сейсмостойких каркасов многоэтажных зданий в развитие СНиП РК 2.03-04-2001. Ч. 2. – Приняты и введены в действие МИТ РК от 03.11.2004 г. № 426 с 1 марта 2005 г. – Алматы: Ин-т Проектстальконструкция, 2005. – 52 с.

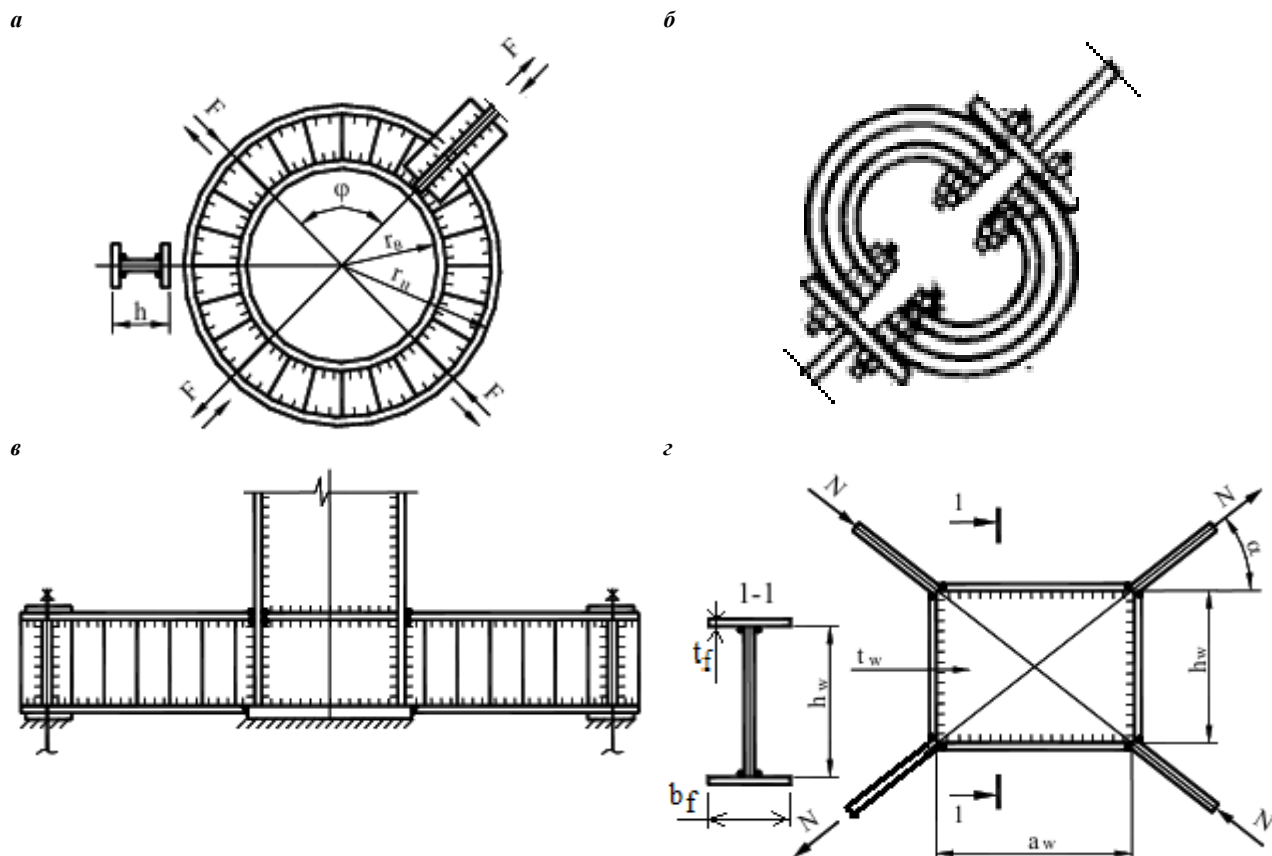
² См. сноску 1.

³ НТП РК 08-01.5-2013. Проектирование сейсмостойких зданий. Ч. 1. Проектирование зданий из стальных конструкций. – Астана, 2024. – 251 с.

⁴ НТП РК-03-02.1-2012 (к СН РК EN 1993-2:2006/2011). Нормативно-техническое пособие Республики Казахстан. Проектирование стальных конструкций. Стальные мосты. – Астана, 2015. – 152 с.

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 [5–7]. Такие ЭП приспособлены для изготовления на заводах металлических, в т.ч. мостовых конструкций.

Однако в мостах, расположенных в сейсмоопасных районах, эти ЭП не применялись. Проектирование таких ЭП может выполняться по действующим нормам Республики Казахстан⁵.



a – кольцевой; *б* – трубчатый; *в* – балочный; *г* – сдвиговой

Рисунок 1. – Упругопластические энергопоглотители [8]

Основные типы упругопластических ЭП представлены на рисунке 2.

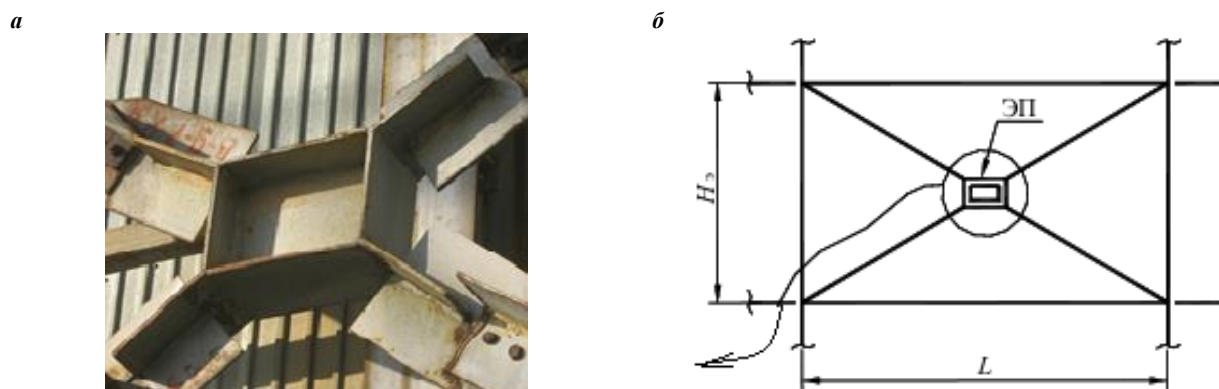


Рисунок 2. – Вид энергопоглотителя сдвигового типа, установленного в связевую систему многоэтажного здания [8]

⁵ См. сноски 3 и 4.

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:

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

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

N – усилие, действующее на ЭПС (см. рисунок 2, z);

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

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:

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

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 [8]. Сравнить энергоемкость различных ЭП при знакопеременных нагрузках можно по удельной энергопоглощающей способности $\overline{W}_{\text{ц}}$. В качестве критерия Г.М. Остриковым предложено [8] 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.

Поглощенная при пластическом деформировании активного элемента удельная энергия $\overline{W}_{\text{ц}}$ определяется работой внутренних напряжений на соответствующих пластических деформациях. В работе [8] предложены формулы для расчета удельной энергии $\overline{W}_{\text{ц}}$, поглощаемой активным пластинчатым элементом ЭП за один цикл жесткого нагружения при его работе:

– на растяжение

$$\overline{W}_{\text{цр}} \approx 2\sigma_{\text{тy}}^2(e - 1)/E\gamma; \quad (3)$$

– на изгиб

$$\overline{W}_{\text{цр}} \approx 1,15\sigma_{\text{тy}}^2(e - 1)^2/eE\gamma; \quad (4)$$

– сдвиг

$$\overline{W}_{\text{цр}} \approx 1,73\sigma_{\text{тy}}^2(e - 1)/E\gamma, \quad (5)$$

где $e = \varepsilon/\varepsilon_{\text{т}}$ – уровень пластического деформирования;

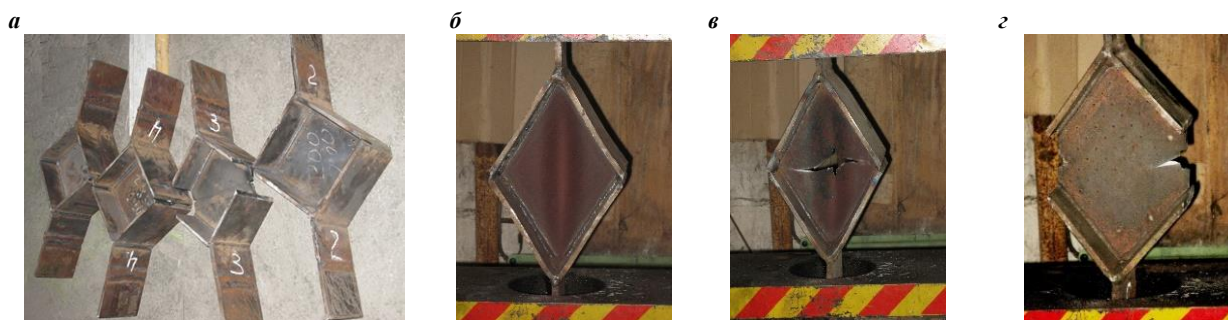
γ – угол сдвига.

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 ВСтЗсп5, 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 потребует соответствующей доработки конструктивных форм ЭП и дополнительных исследований их работы.

Поля температур поверхности образцов ЭПС. Общие виды образцов ЭПС показаны на рисунке 3, *а*. Размеры образцов – 220×220 мм, толщина листов – 10 мм. Материал – ВСтЗспб. 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.

⁶ См. сноски 1, 3 и 4.

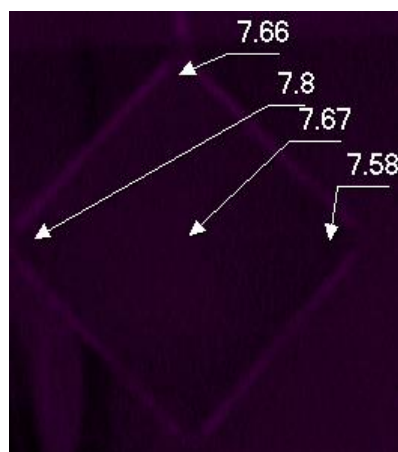


а – образцы ЭПС перед испытанием; **б** – вид образца типа ЭПС с активным элементом без конструктивных концентраторов; **в** – вид образца типа ЭПС с отверстием в середине активного элемента; **г** – вид образца типа ЭПС с боковыми вырезами в активном элементе

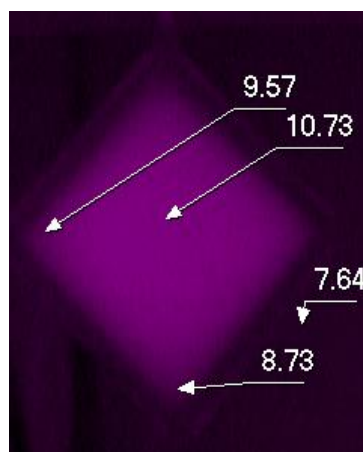
Рисунок 3. – Экспериментальные энергопоглотители ЭПС и их вид в стадии предразрушения

Кадры термофильма образца без конструктивных дефектов в стенке приведены на рисунке 4, 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 (см. рисунок 3, б).

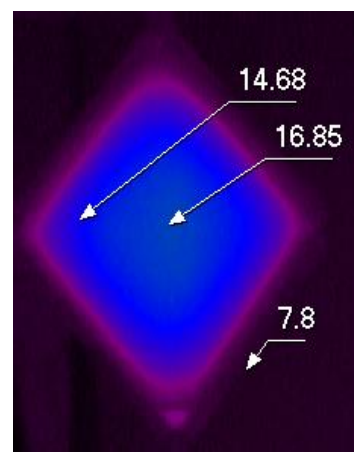
Кадр 1. Время 2.3 с



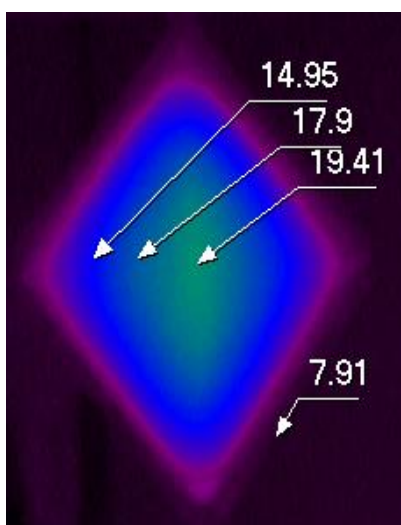
Кадр 27. Время 63 с



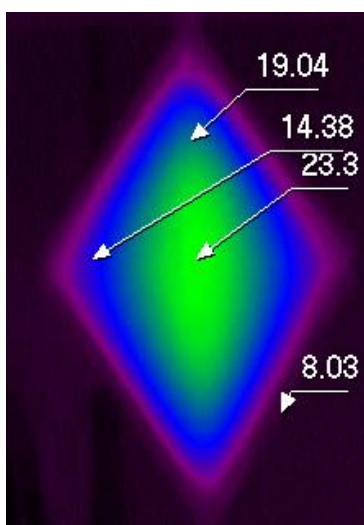
Кадр 50. Время 116 с



Кадр 58. Время 135 с



Кадр 76. Время 177 с



Кадр 110. Время 256 с

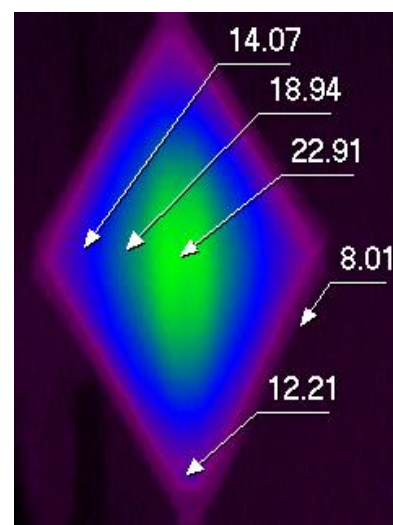


Рисунок 4. – Кадры термофильма деформационного нагрева образца без дефектов в стенке

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

Возможное расположение ЭП в мостовых балочных сооружениях. Предполагаем, что устой 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.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

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 дополнительных 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Raab Nigel. The Tashkent Earthquake of 1966: The Advantages and Disadvantages of a Natural Tragedy // *Jahrbücher für Geschichte Osteuropas*. – 2014. – № 62(2). – P. 273–294. URL: <https://www.jstor.org/stable/43819634>.
2. Нишоннов Н.А., Солиев Д.Т., Куйчиев О.А. Особенности повреждения искусственных сооружений при землетрясениях // *Scientific progress*. – 2021. – Т. 2, № 7. – С. 854–860. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-povrezhdeniya-iskusstvennyh-sooruzheniy-pri-zemletryaseniayah>.
3. Исследование повреждения дорожных сооружений при сильных землетрясениях / М.Ч. Апсеметов, Д.К. Мурзакматов, Э.Э. Женишбеков и др. // *Изв. ОшТУ*. – 2017. – № 3. – С. 36–42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-povrezhdeniya-iskusstvennyh-sooruzheniy-pri-zemletryaseniayah>.
4. Анализ повреждений зданий и мостовых сооружений при сильных землетрясениях / М.Ч. Апсеметов, Д.К. Мурзакматов, А.А. Приходько и др. // *Вестн. Кыргыз. гос. ун-та стр-ва, транспорта и архитектуры*. – 2019. – № 3. – С. 479–483.
5. Жунусов Т.Ж., Апсеметов М.Ч. Сейсмоизолирующие узлы в конструкциях мостов // *Вестн. КГУСТА*. – 2002. – № 1. – С. 49.
6. Апсеметов М.Ч., Андашев А.Ж. Разработка надежных и технологичных конструкций сейсмоизолирующих опор из упругих, пластичных и антифрикционных материалов // *Вестн. Кыргыз. гос. ун-та стр-ва, транспорта и архитектуры*. – 2012. – № 3. – С. 82–89.
7. Апсеметов М.Ч., Айдаралиев А.Е., Шекербек У.Т. Сейсмоизоляция пролетных строений балочных мостов // *Вестн. Кыргыз. гос. ун-та стр-ва, транспорта и архитектуры*. – 2006. – Т. 6, № 9. – С. 152–156.
8. Остриков Г.М., Максимов Ю.С. Стальные сейсмостойкие каркасы многоэтажных зданий. – Алма-Ата: Казахстан, 1985. – 120 с.

REFERENCES

1. Raab, Nigel (2014). The Tashkent Earthquake of 1966: The Advantages and Disadvantages of a Natural Tragedy. *Jahrbücher für Geschichte Osteuropas*, 62(2), 273–294. URL: <https://www.jstor.org/stable/43819634/>
2. Nishonov, N.A. Osobennosti povrezhdeniya iskusstvennyh sooruzhenij pri zemletryaseniayah / N.A. Nishonov, D.T. Soliev, O.A. Kujchiev // *Scientific progress*. – 2021. – Т. 2, № 7. – С. 854–860. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-povrezhdeniya-iskusstvennyh-sooruzheniy-pri-zemletryaseniayah>.
3. Apsemetov, M.Ch. Issledovanie povrezhdeniya dorozhnyh sooruzhenij pri sil'nyh zemletryaseniayah / M.Ch. Apsemetov, D.K. Murzakmatov, E.E. Zhenishbekov, A.O. Shekaev // *Izvestiya OshTU*. – 2017. – № 3. – С. 36–42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-povrezhdeniya-iskusstvennyh-sooruzheniy-pri-zemletryaseniayah>.
4. Apsemetov, M.Ch. Analiz povrezhdenij zdaniy i mostovyh sooruzhenij pri sil'nyh zemletryaseniayah / M.Ch. Apsemetov, D.K. Murzakmatov, A.A. Prihod'ko, A.A. Toguztoroev // *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arhitektury*. – 2019. – № 3. – С. 479–483.
5. Zhunusov, T.Zh. Sejsmoizoliruyushchie uzly v konstrukciyah mostov / T.Zh. Zhunusov, M.Ch. Apsemetov // *Vestnik KGUSTA*. – 2002. – № 1. – С. 49.
6. Apsemetov, M.Ch. Razrabotka nadezhnyh i tekhnologichnyh konstrukcij sejsmoizoliruyushchih opor iz uprugih, plastichnyh i antifrikcionnyh materialov / M.Ch. Apsemetov, A.Zh. Andashev // *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arhitektury*. – 2012. – № 3. – С. 82–89.
7. Apsemetov, M.Ch. Sejsmoizolyaciya proletnyh stroenij balochnykh mostov / M.Ch. Apsemetov, A.E. Ajdaraliev, U.T. Shekerbekov // *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arhitektury*. – 2006. – Т. 6, № 9. – С. 152–156.
8. Ostrikov, G.M., Stal'nye sejsmostojkie karkasy mnogoetazhnyh zdaniy / G.M. Ostrikov, Yu.S. Maksimov. – Alma-Ata: Kazakhstan, 1985. – 120 s.

Поступила 26.03.2025

HEAT GENERATION IN ENERGY ABSORBERS OF SHEAR TYPE

E. MOISEYCHIK, SH. ESHONKHUJAEVA
(Belarusian National Technical University, Minsk)

Based on the analysis of literature sources, it is shown that steel energy absorbers using the active elements in the elastic-plastic and plastic stages of work can be used to protect massive bridge structures. The article proposes locations of elastic-plastic steel energy absorbers in span bridge structures and shows their energy efficiency. Experimentally, using laboratory samples made of low-carbon plastic steel, it has been proven that in the vicinity of structural and technological defects (holes, cutouts) in stretched and sheared elements of EA structures, localization of deformations occurs, especially at the elastic-plastic and plastic stages of steel work, with an increase in the average temperature of the steel surface during deformation by several tens of degrees (up to 90°C), which allows in the mode monitoring by the temperature field of the active element to control the performance of elements of steel span structures of bridges and energy absorbers.

Keywords: seismic resistance, energy absorbers, shear deformations, energy capacity, heat generation.