

Строительная механика и расчет сооружений

УДК 694.01

© У Фэй, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: 123982089@qq.com

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-5-29-40

© Wu Fei, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: 123982089@qq.com

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОГО СОЕДИНЕНИЯ КАРКАСА ЗДАНИЯ И CLT-ПАНЕЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ ФРИКЦИОННОГО ДЕМПФЕРА С РАЗЛИЧНЫМИ ПРОКЛАДКАМИ СКОЛЬЖЕНИЯ

STUDY ON SEISMIC-RESISTANT CONNECTIONS BETWEEN BUILDING FRAMES AND CLT PANELS USING FRICTION DAMPERS WITH VARIOUS SLIDING SHIM MATERIALS

В связи с экономическими и эксплуатационными потребностями сейсмоусиления существующих зданий исследуются резиновые и алюминиево-резиновые композитные прокладки во фрикционные демпферы (AFC) в комбинации с CLT-панелями для усиления железобетонных каркасов. Путем циклических испытаний систематически сравнивали гистерезисные характеристики, эффективность диссипации энергии и температурные изменения прокладок трех видов: резиновых, алюминиевых и комбинированных из этих двух материалов. Результаты показали: комбинированные прокладки сохранили высокую прочность алюминия, эффективно устранили эксцентриситет за счет адаптивности резины, продемонстрировали превосходную эффективность диссипации энергии ($\mu = 0,18$) без разрушения резинового слоя. Резиновые прокладки, несмотря на экономичность и компенсацию эксцентриситета, подвержены разрушению при циклическом нагружении. Изученная система предлагается как новое решение для сейсмоусиления деревянно-бетонных конструкций в сейсмоопасных регионах России.

Ключевые слова: сейсмостойкость, сейсмоусиление, фрикционный демпфер, CLT-панели, композитные прокладки, эксцентриситет, диссипация энергии.

This study addresses the economic and safety needs of seismic retrofitting for existing buildings by innovatively integrating rubber gaskets and aluminum-rubber composite gaskets into friction dampers (AFC) combined with CLT panels for reinforcing reinforced concrete frames. Through cyclic loading tests, the hysteretic performance, energy dissipation efficiency, and temperature characteristics of aluminum, rubber, and composite gaskets were systematically compared. Experimental results show that the composite gasket effectively resolves eccentricity issues while maintaining the high strength of aluminum, achieving superior energy dissipation efficiency ($\mu = 0.18$) without damage to the rubber layer. Although rubber gaskets offer economic benefits and mitigate eccentricity effects, they are prone to failure under cyclic loading. This system provides a novel solution for seismic retrofitting of wood-concrete hybrid structures in earthquake-prone regions of Russia.

Keywords: earthquake resistance, seismic retrofitting, friction damper, CLT panels, combined shims, eccentricity, energy dissipation.

Введение

Воздействие сейсмических явлений на существующую застройку в настоящее время является крайне значимым, затрагивая экономические, социальные, экологические

аспекты и условия жизни населения. Сейсмоусиление и модернизация зданий представляют собой комплексную и актуальную научно-практическую задачу современности. Существует множество типов кон-

структивных решений для сейсмоусиления, реконструкции и модернизации зданий, при этом усиление и преобразование несущих конструкций играют критически важную роль [1].

В Европе впервые в каркасных системах были применены скользящие фрикционные устройства в качестве дополнительного источника демпфирования [2], где механическое демпфирование, возникающее при скольжении, обеспечивало диссипацию энергии. По мере увеличения исследований в данной области в 1989 году была разработана фрикционная связь типа «сложное болтовое соединение» (slotted bolted connection, SBC) [3], особенностью которой являлось использование тарельчатых пружин (Belleville) для поддержания болтового натяжения. Это позволяет получать стабильную близкую к прямоугольной петлю гистерезиса при циклическом нагружении, обеспечивая надежную и проектируемую способность к фрикционному рассеянию энергии, а также точный контроль максимальных горизонтальных сил, воспринимаемых конструкцией.

При разработке и исследовании фрикционных демпферов [4] выделяют три основных типа диссипации энергии: активные, полупассивные и пассивные. Соединения SBC подразделяются на два основных класса: симметричные и асимметричные фрикционные соединения. Асимметричное фрикционное соединение (asymmetric friction connection, AFC) было первоначально предложено Клифтоном (Clifton) [5]. В работе [6] фрикционный демпфер был усовершенствован до AFC, состоящего из фрикционных прокладок, накладок, покрывающих листов, высокопрочных болтов и нижнего фланца балки [7].

Поскольку стальные поверхности без прокладок имеют нежелательные свойства в процессе разработки впервые были применены латунные прокладки. Однако их высокая стоимость и необходимость дальнейших

исследований альтернативных материалов обусловили поиск других решений. В последующих исследованиях фрикционных демпферов область их применения была расширена за счет использования прокладок из низкоуглеродистой стали и алюминия [8]. AFC характеризуются простотой изготовления, высокой экономической эффективностью и способностью рассеивать энергию при сейсмических воздействиях. Однако стабильность гистерезиса AFC в значительной степени зависит от взаимной твердости стального слоя и слоя прокладки. Кроме того, стабильность поведения при циклическом нагружении зависит от взаимодействия между абразивными частицами и материалом прокладки. Таким образом, частицы износа, образующиеся на начальной стадии, имеют решающее значение для достижения стабильной работы AFC.

Алюминиевые прокладки зарекомендовали себя как достаточно эффективный материал, демонстрирующий самый низкий и стабильный коэффициент трения. Однако в ходе дальнейших исследований [9] было выявлено, что при установке между двух стальных элементов, соединенных болтами, фрикционного демпфера с алюминиевыми прокладками возникает проблема эксцентриситета. Данная проблема может быть частично решена путем корректировки положения соединения, однако для ее фундаментального устранения требуются дополнительные изыскания.

Исследовалось применение резиновых материалов в пассивных фрикционных демпферах. Резина действительно обладает определенной мягкостью и упругостью, являясь при этом экономически выгодным материалом. Наблюдения показали, что данное решение дает превосходные гистерезисные характеристики [10]. Однако авторы ограничились добавлением резиновых шайб под болты, не рассматривая использование резинового материала в качестве прокладки по всей контактной поверхности. Благодаря

способности к сверхупругой деформации резина может заполнять микрозазоры, смягчая и компенсируя влияние эксцентриситета. Более того, в [11] была разработана теория контакта шероховатых поверхностей, согласно которой мягкие материалы (например, резина) могут компенсировать неровности за счет упругой деформации. Это подтверждает, что такие материалы способны повышать равномерность контакта на шероховатых границах раздела, существенно подавляя влияние эксцентриситета. Следовательно, включение резиновых прокладок в систему фрикционного демпфера представляется целесообразным.

Учитывая, что часть территории Российской Федерации расположена в сейсмоопасных регионах, вопросы сейсмического проектирования и сейсмоусиления многоэтажных деревянных зданий требуют самого пристального внимания [12]. При сейсмоусилении [13–14] использование древесины в качестве строительного материала является экологически предпочтительным выбором. В частности, перекрестно клееные деревянные панели (cross-laminated timber, CLT) обладают высокими эксплуатационными характеристиками и демонстрируют отличное сейсмическое поведение. Автор работы [15] предложил систему сейсмоусиления, объединяющую железобетонный каркас с CLT-панелями и фрикционными демпферами. На конференции WCTE [16] были представлены результаты дальнейшей разработки и развития AFC с особым акцентом на исследование влияния соединения гибридного конструктивного типа (НУВ) с древесиной на фрикционное поведение.

На сегодняшний день, за исключением работ Boggian и др. [15, 16], исследования комбинированной системы CLT-панелей и соединений AFC практически не проводились. Для России анализ и изучение данной проблемы представляют значительный научный и практический интерес.

Методы

В статье в качестве объекта для анализа и исследования используется фрикционный демпфер, предложенный в [13, 14], а контур профиля скорректирован в соответствии с российским стандартом СП 64.13330.2017 (рис. 1).

В соответствии со схемой использования прокладок, предложенной в [8, 9], были разработаны три варианта, в которых в скользящую контактную поверхность профиля добавлены резиновые прокладки, алюминиевые прокладки и комбинация алюминиево-резиновых прокладок для анализа и исследования (рис. 2).

В табл. 1 указаны материалы, использованные в данном эксперименте для трех типов образцов.

Экспериментальный стенд представлен на рис. 3. Для исследования были выбраны два фрикционных демпфера, собранные из двух стальных профилей Q235 толщиной 8 мм, и трехслойная CLT-панель размерами 400×810 мм, толщиной 120 мм. На одном из профилей имеется скользящий канал шириной 17 мм, обеспечивающий возможность относительного скольжения между

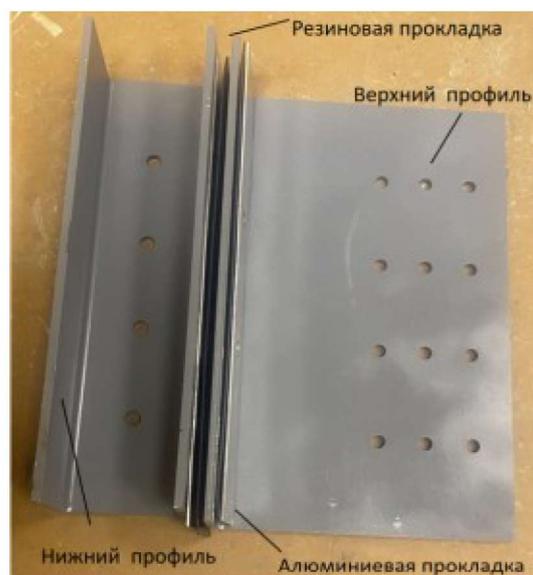


Рис. 1. Регулируемый фрикционный демпфер (ФД)

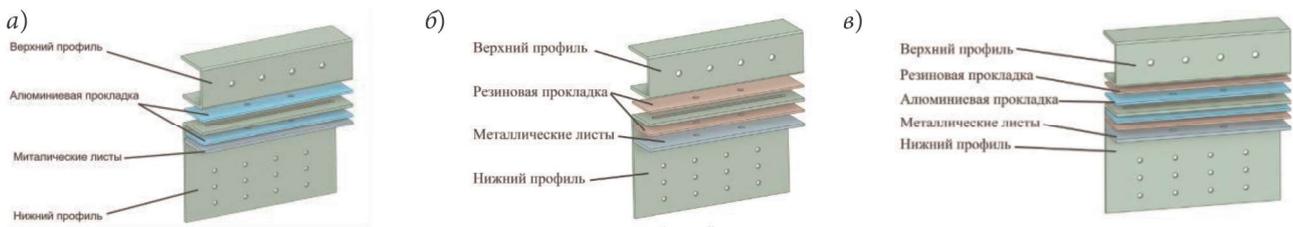


Рис. 2. Фрикционный демпфер с различными прокладками: а — алюминиевыми; б — резиновыми; в — алюминиево-резиновыми

соединяемыми деревянными элементами (или элементом и стальной деталью) в одном направлении с общим расчетным перемещением 100 мм. Толщина алюминиевой и резиновой прокладок составляет 2 мм, размеры — 85×450 мм.

Экспериментальные исследования проводились в испытательном центре СПбГАСУ в секторе механических испытаний строительных конструкций. Силовой кронштейн закреплен на подвижном штоке пресса, при этом нижний профиль соединен с данной конструкцией посредством четырех болтов М14. Образец из перекрестно клееной древесины фиксируется на платформе машины с помощью четырех шпилек и верхнего кронштейна. Верхний профиль демпфера крепится к CLT 12 глухарями диаметром 12 мм, при этом прокладки и металлическая пластина толщиной 8 мм стянуты с двумя профилями болтами М16 класса прочности 10.9. Фрикционное соединение состоит из металлической накладки и двух алюминиевых прокладок (либо двух резиновых прокладок, либо комбинации двух алюминиевых и двух резиновых прокладок), что улучшает фрикционное поведение и позволяет наблюдать гистерезисные характеристики прокладок. Термопары установлены на контактных поверхностях трения и закреплены изоляционной лентой. Инклинометр и два датчика перемещения LVDT для фиксации смещения верхнего фрикционного демпфера в ходе выполнения программы нагружения подключены к фиксирующему электронному блоку (рис. 4).

На нижнем фрикционном демпфере установлен тросиковый датчик перемещения (рис. 4, а), регистрирующий перемещение подвижного штока пресса. Измерения выполняются высокоточными датчиками (погрешность 0,01) с использованием высокоскоростной системы сбора данных Keyence NR-X100, управляемой ПК (рис. 4, б). Система обеспечивает синхронную регистрацию данных с нескольких датчиков и их временную согласованность. Используемый метод синхронизации по временным меткам (рис. 4, в) гарантирует корреляцию данных пресса и датчиков, что позволяет установить зависимости между силой скольжения, перемещением, температурой в зоне фрикционных прокладок и диссипированной энергией.

Согласно [16] предварительное усилие прижима демфирующих прокладок было установлено на 25 кН, что соответствует моменту затяжки болтов динамометрическим ключом, равному 57 Н · м [17],

$$M_k = nkB_0d, \quad (1)$$

где M_k — момент затяжки, Н · м; n — коэффициент, принимаемый равным 1,06 при на-

Таблица 1

Материалы демпфера

№	Наименование	Марка	Кол-во
1	CLT-панели	3-слойные	1
2	Верхний профиль	Q235	2
3	Нижний профиль	Q235	2
4	Резиновая прокладка	ТМКЩ-С	2
5	Алюминиевая прокладка	АД1Н	2
6	Металлический лист	С245	1

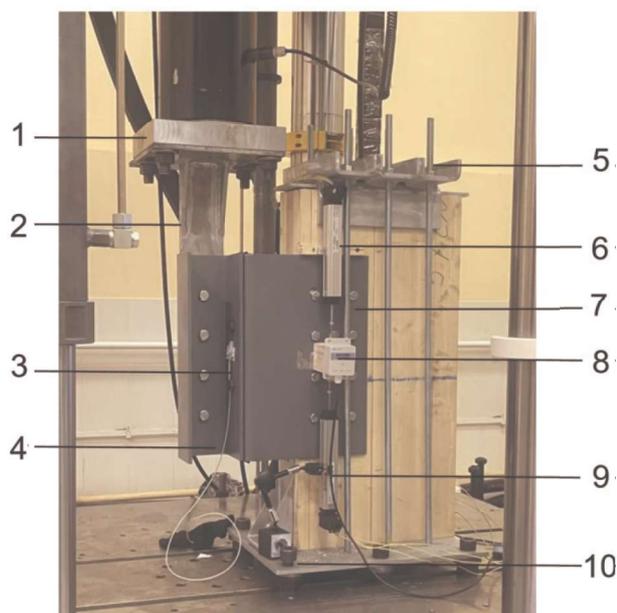


Рис. 3. Экспериментальный стенд для исследования динамических характеристик фрикционного демпфера: 1 — машина Magnum 2000 кН; 2 — силовой кронштейн; 3 — термопары; 4 — нижний фрикционный демпфер; 5 — верхний кронштейн; 6 — верхний датчик перемещения LVDT; 7 — верхний фрикционный демпфер; 8 — инклинометр; 9 — нижний датчик перемещения LVDT; 10 — нижнее крепление

тяжении и 1,0 при контроле высокопрочных болтов; k — среднее значение коэффициента закручивания для каждой партии болтов по сертификату, принимаемое равным 0,18 при отсутствии данных; d — номинальный диаметр резьбы болта, мм; B_0 — усилие натяжения болта, Н.

Затяжка прижимных болтов демпфера производилась динамометрическим ключом в соответствии с требованиями ГОСТ 33530–2015 (рис. 5).

Циклический режим нагружения для экспериментальных исследований установлен в соответствии с требованиями стандарта ISO 16670:2003 (рис. 6)

План и схемы комбинированных прокладок представлены в табл. 2.

В рамках испытания были приняты два протокола циклического нагружения — А и В, причем протокол В — это двукратно повторенный протокол А. После завершения

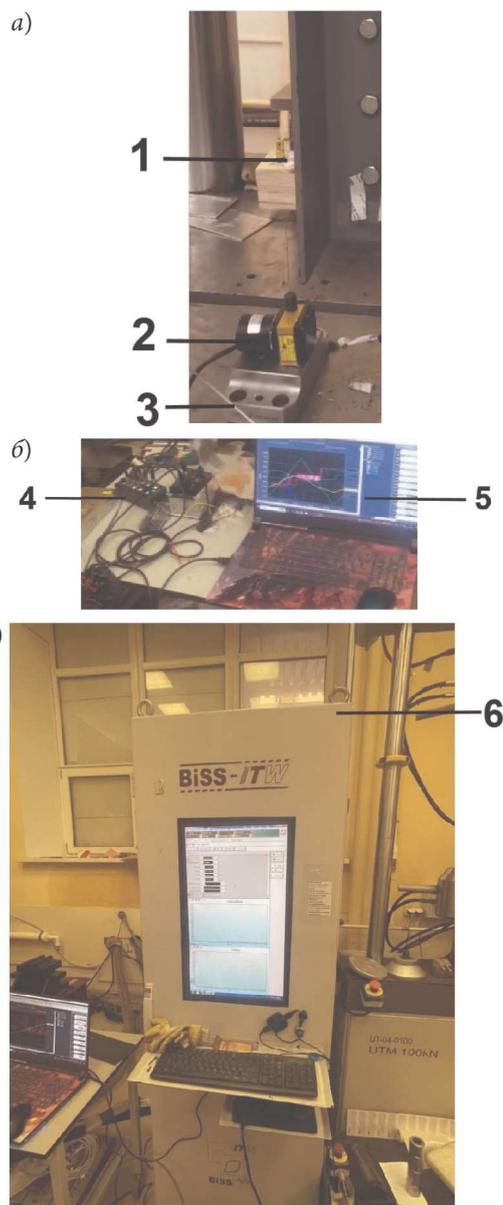


Рис. 4. Контрольно-измерительная аппаратура: 1 — нижний фрикционный демпфер; 2 — тросиковый датчик перемещения; 3 — магнитное крепление; 4 — лазерный датчик смещения Keyence NR-X100; 5 — компьютер, используемый для управления датчиком; 6 — дисплей управления испытательной машиной

цикла раскручивались прижимные болты, производилась смена прокладок, после чего повторно затягивали динамометрическим ключом до $57 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (см. табл. 2). Это позволило наблюдать за изменением динамического коэффициента трения прокладок и способности системы рассеивать энергию.



Рис. 5. Значение настройки динамометрического ключа

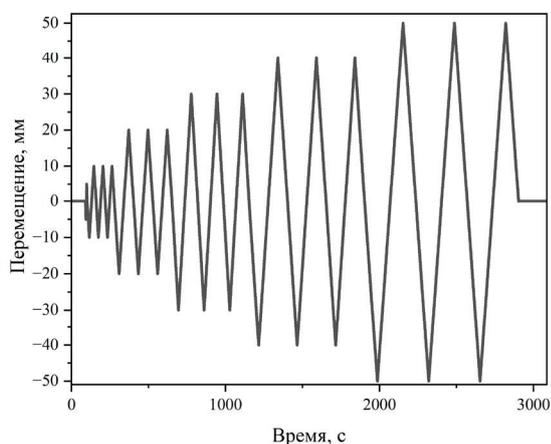


Рис. 6. Испытательный протокол воздействия циклической нагрузки. А: 1×5 мм + 3×(10, 20, 30, 40, 50) мм, 2 мм/с; В: тот же самый цикл дважды

Результаты и обсуждение

На рис. 7 показана работа системы фрикционного демпфера и CLT-панелей, подтверждающая возникновение скольжения в системе. На рис. 7, а представлены результаты с алюминиевой прокладкой, рис. 7, б — с резиновой прокладкой, рис. 7, в — с комбинированной прокладкой.

В соответствии с требованиями стандарта [13] было выполнено два цикла нагружения. Во время второго цикла два болта были сняты и повторно затянуты с моментом 57 Н · м, остальные настройки не изме-

Таблица 2

План проведения испытаний соединения ФД и CLT-панелей (усилие затяжки = 57 Н · м)

Тип испытания	Прокладки	Протокол
1	Алюминиевая	А
2	Резиновая	А
3	Комбинированная	А
4	Алюминиевая	В
5	Резиновая	В
6	Комбинированная	В

нялись. Перед испытанием было проведено обследование зоны соединения, которое показало отсутствие повреждений и смещений в болтовых и винтовых соединениях, что подтвердило плотность монтажа в зоне контакта. Это позволило устранить проблему эксцентриситета, упомянутую в работе [9].

Петля гистерезиса «нагрузка–перемещение» имеет форму, близкую к прямоугольной, что соответствует идеальному состоянию упругопластической системы. Кривые, представленные в виде наложений разного цвета, соответствуют идентичным повторениям схем протоколов нагружения.

Для расчета диссипированной энергии в данной системе применяется формула (2) основанная на использовании положительных и возрастающих физических величин [5]. Данный метод расчета свободен от недостатков прямого метода, поэтому в работе используется аналогичный подход. Расчетная формула позволяет определить силу скольжения и вычислить величину рассеиваемой энергии:

$$E = \sum_{i=0}^n E_i = \sum_{i=0}^n \left| \frac{F_{i+1} + F_i}{2} (\delta_{i+1} - \delta_i) \right|, \quad (2)$$

где E — полная диссипированная гистерезисная энергия; E_i — энергия, диссипированная на i -м шаге по времени; F_i — нагрузки на i -м шаге по времени; δ_i — перемещение на i -м шаге по времени.

С помощью формулы (2) получен график диссипирования энергии во времени (рис. 8). Кривые, представленные в виде наложений

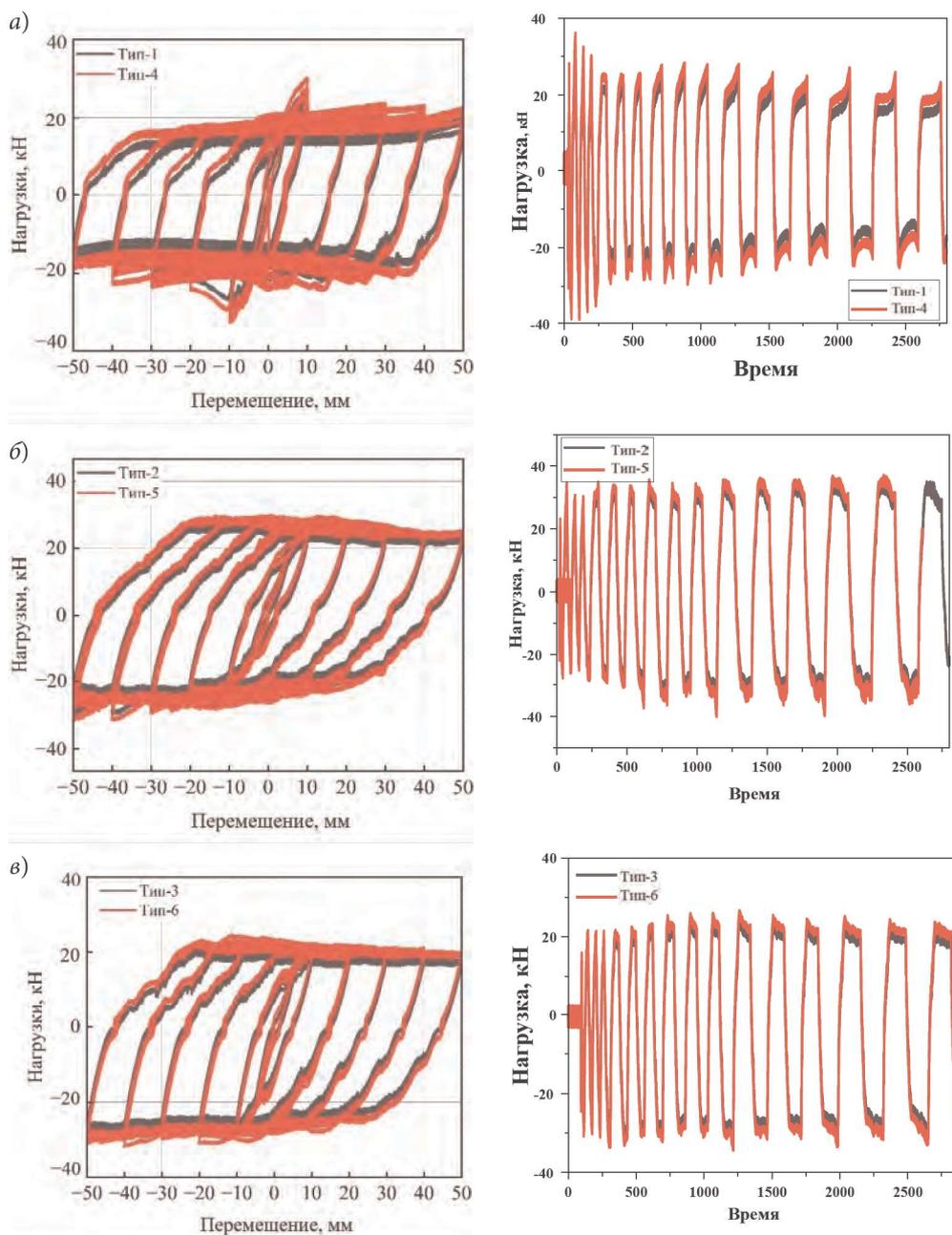


Рис. 7. Графики гистерезиса «нагрузка — перемещение» для шести типов испытаний:
 а — тип 1 и тип 4; б — тип 2 и тип 5; в — тип 3 и тип 6

разного цвета, соответствуют идентичным повторениям схем протоколов нагружения.

Накопленное перемещение D представляет собой сумму количества временных шагов:

$$D = \sum_{i=0}^n |\delta_{i+1} - \delta_i|, \quad (3)$$

где δ_i — перемещение на i -м шаге по времени; n — число временных шагов.

Формула для расчета скольжения:

$$F_{\text{скольжения}} = \frac{E}{D}. \quad (4)$$

Экспериментальный коэффициент трения μ рассчитывается по формуле

$$\mu = \frac{F_{\text{скольжения}}}{n_s n_b F_p}, \quad (5)$$

где n_s — число сдвиговых поверхностей; n_b — число предварительно затянутых болтов; F_p — предварительное усилие прижима.

В соответствии с [8] коэффициент стабильности гистерезиса представляет собой показатель стабильности рассеяния энергии λ , выражаемый формулой

$$\lambda = F_{\text{скольжения}} \sqrt{\frac{n-1}{\sum_{i=0}^n (F_i - F_{\text{скольжения}})^2}}, \quad (6)$$

где F_i — нагрузки на i -м шаге по времени; n — число временных шагов.

Согласно методу анализа модели контактной механики [11], эксцентриситет e можно рассчитать на основе значения, полученного датчиком LVDT, по формуле

$$e = \frac{1}{n} \sum e_i = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{|\delta_{LVDT1} - \delta_{LVDT2}|_i}{L}, \quad (7)$$

где e_i — эксцентриситет на i -м шаге по времени; δ_{LVDT1} — значение перемещения верхнего датчика LVDT; δ_{LVDT2} — значение перемещения нижнего датчика LVDT; L — рас-

стояние между датчиками LVDT; n — временной шаг.

На основании формул (2)–(7) определяются средний коэффициент скольжения μ и средний параметр стабильности λ для образцов.

Путем расчета и данных измерений термопарами была получена зависимость экспериментального коэффициента трения от диссипации энергии и температуры (рис. 9).

По расчетным формулам на основе экспериментальных данных составлена сводная табл. 3. По формулам (2)–(7) рассчитано общее значение рассеянной сдвиговой энергии, а также суммарное смещение D и коэффициент трения. Как видно из табл. 3, при одинаковых прокладках наблюдаются различия в значениях D при разных испытаниях. По формуле (4) вычисляется среднее значение силы скольжения образца. Поскольку система соединена двумя болтами, экспериментальный коэффициент трения определяется по формуле (5).

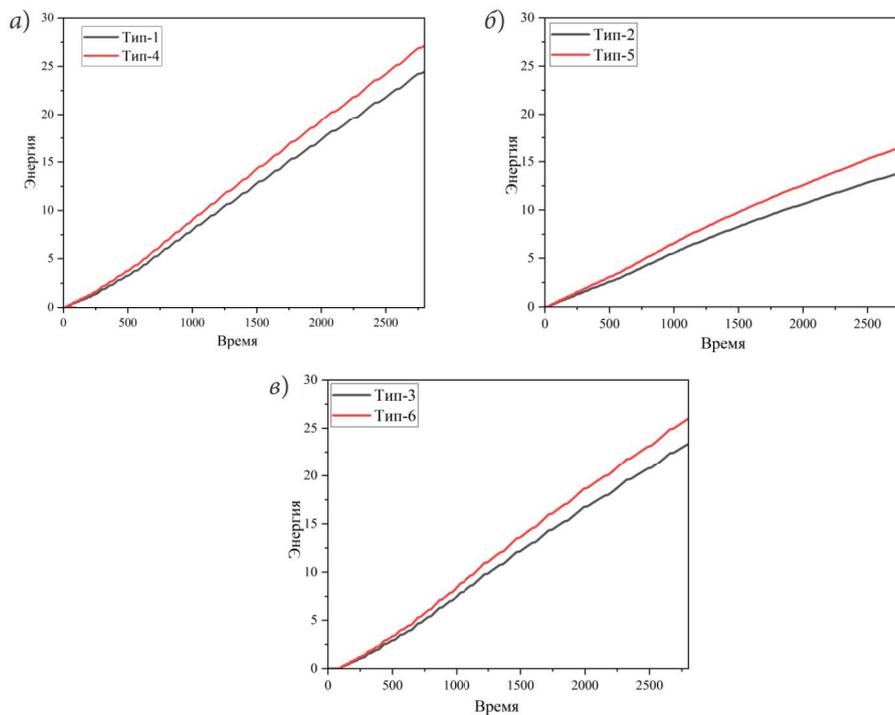


Рис. 8. Графики зависимости рассеяния энергии от времени для шести типов испытаний: а — тип 1 и тип 4; б — тип 2 и тип 5; в — тип 3 и тип 6

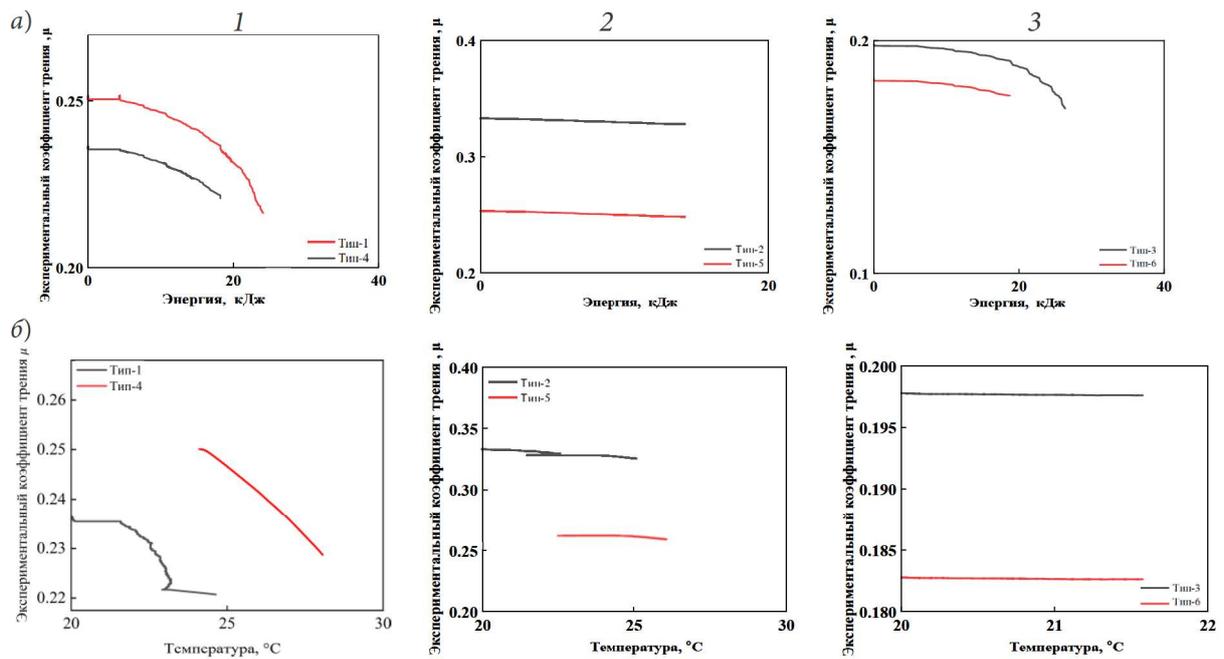


Рис. 9. Зависимость экспериментального коэффициента трения от энергии диссипации и температуры для разных типов фрикционных прокладок: а — график « μ –энергия»; б — « μ –температура»; 1 — алюминиевая прокладка; 2 — резиновая прокладка; 3 — комбинированная прокладка; — 1-й цикл испытаний; — 2-й цикл испытаний

Таблица 3

Сводная таблица расчетных параметров работы фрикционного демпфера

№ п/п	Обозначение параметра	Ед. изм.	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	Тип 6
1	Протокол		A	A	A	B	B	B
2	$\sum_{i=0}^n \left \frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right $	кН	4,72257E+06	2,49162E+06	7,39826E+06	5,24685E+06	3,03034E+06	8,19962E+06
3	$E = \sum_{i=0}^n E_i$	кДж	4,65374E+04	6,06795E+04	3,53428E+04	3,97193E+04	4,79271E+04	3,56894E+04
4	D	мм	1,83218E+03	1,83321E+03	1,83123E+03	1,83038E+03	1,82927E+03	1,83023E+03
5	$F_{A>;L6\ 5=80}$	кН	25,4	33,1	19,3	21,7	26,2	19,5
6	μ	–	0,25	0,33	0,19	0,22	0,26	0,18
7	n_s	–	2	2	2	2	2	2
8	n_b	–	2	2	2	2	2	2
9	$\sqrt{\frac{n-1}{\sum_{i=0}^n (F_i - F_{A>;L6\ 5=80})^2}}$	–	2,89764E-01	1,85801E-01	4,83419E-01	3,85253E-01	2,04580E-01	4,97436E-01
10	λ	–	7,36	6,15	9,33	8,36	5,35	9,7
11	$ \delta_{LVDT1} - \delta_{LVDT2} $	мм	5,236569E+05	2,551149E+05	2,416878E+05	5,6393823E+05	3,0882334E+05	2,826072E+04
12	L	мм	60	60	60	60	60	60
13	$\sum e$	–	8,72761E+03	4,25191E+03	4,02813E+03	9,39897E+03	5,14705E+03	3,80434E+03
14	e	–	3,9E-02	1,9E-02	1,8E-02	4,2E-02	2,3E-02	1,7E-02

Сравнительный анализ расчетных данных, полученных по формуле (7), показал, что по сравнению с алюминиевой прокладкой резиновая уменьшает эксцентриситет на 51,3 %, а комбинированная алюминиево-резиновая прокладка — на 53,8 %.

В ходе испытаний установлено, что резиновая прокладка подверглась разрушению после двух циклов нагружения (рис. 10, б). Вероятно, это обусловлено недостаточной предельной прочностью резиновой прокладки для самостоятельного восприятия циклических нагрузок. Алюминиевая прокладка продемонстрировала достаточную работоспособность (рис. 10, а), тогда как в комбинированной прокладке (рис. 10, в) резиновый элемент разрушен не был и сохранил полноценную гистерезисную характеристику. Расчет по критерию устойчивости [13] выявил стабильные характеристики комбинированной прокладки.

После испытания CLT-панели и нагели были осмотрены. Как показано на рис. 11, а, древесина не выглядела поврежденной, а средний диаметр отверстия увеличился до 8,1 мм (исходный диаметр отверстия составлял 7 мм), что соответствовало требованиям допуска. После демонтажа стенда было обнаружено, что нагели не претерпели значительной деформации (рис. 11, б).

Выводы

На основании результатов экспериментального исследования сформулированы следующие основные выводы:

1. Система демонстрирует квазипрямоугольные петли гистерезиса для всех типов прокладок, подтверждая эффективность диссипации энергии. Экспериментальный коэффициент трения μ коррелирует со стабильностью рассеяния энергии λ : чем ниже μ , тем выше λ . Наблюдается значительная разница в стабильности: комбинированные прокладки превосходят алюминиевые и резиновые по значению λ , что доказывает устойчивость энергорассеивания комбинированных прокладок.

2. Значение полученного коэффициента трения алюминиевых прокладок $\mu = 0,22$ сопоставимо с данными [15]. Однако установлено, что алюминиевые прокладки не устраняют эксцентриситет, возникающий при циклическом нагружении. Введение же резиновых прокладок увеличивает фрикционное сопротивление резины ($\mu = 0,33$) и дает снижение эксцентриситета на 51,3 % по сравнению с алюминиевыми. Однако низкий предел прочности резины и недостаточная стабильность структуры приводят к разрушению этого материала при циклических нагрузках (см. рис. 10, б), что ограничивает

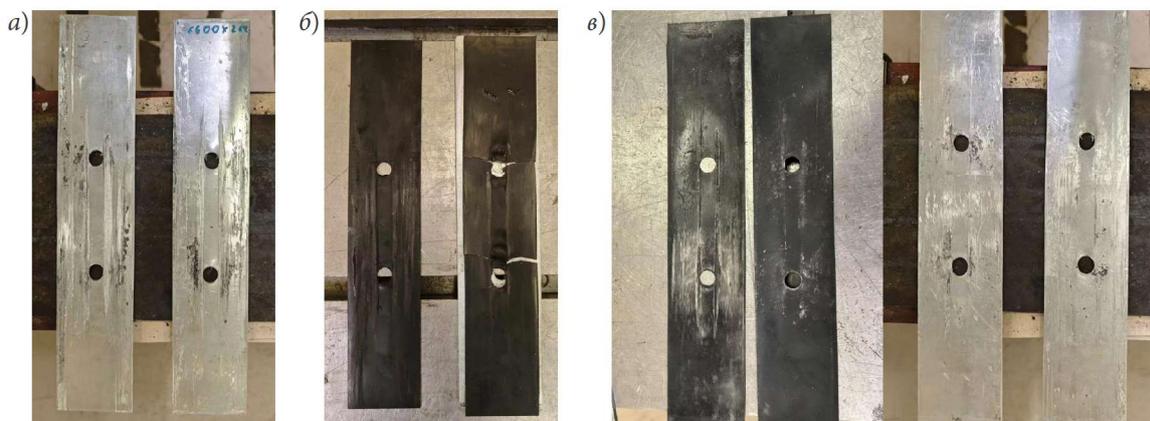


Рис. 10. Состояние прокладок различных образцов после испытаний: а — типа 1 и типа 4; б — типа 2 и типа 5; в — типа 3 и типа 6

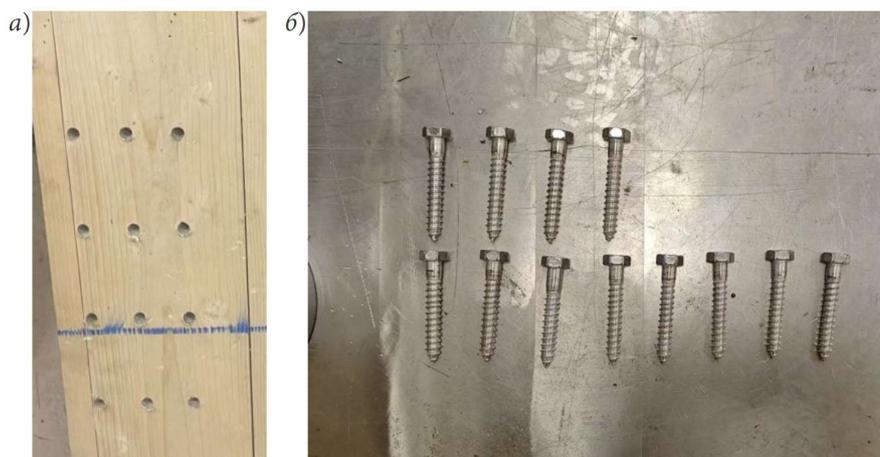


Рис. 11. Вид образца CLT-панели и нагелей после испытания:
а — деформированные отверстия в CLT-панели; б — нагели

их применение в качестве основных фрикционных элементов.

3. Аллюминиево-резиновые композитные прокладки показали высокую устойчивую квазипрямоугольную гистерезисную петлю (см. рис. 7), при этом резиновый слой не подвергается разрушению благодаря синергетическому эффекту материалов: алюминий обеспечивает высокую прочность фрикционного контакта, резина компенсирует контактные дефекты, вызывающие эксцентриситет. Изученная система предлагается как новое решение для сейсмоусиления деревянно-бетонных конструкций в сейсмоопасных регионах России.

Библиографический список

1. *Белаш Т. А.* Особенности строительства и эксплуатации сейсмостойких зданий // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2008. № 4 (17). С. 5–16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-stroitelstva-i-ekspluatatsii-seysmostoykih-zdaniy> (дата обращения: 20.03.2025).
2. *Pall A. S., Marsh C.* Response of friction damped braced frames // Journal of the Structural Division. 1982. Vol. 108 (6). Pp. 1313–1323.
3. *Fitzgerald T. F., Anagnos T., Goodson M., Zsutty T.* Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections // Earthquake Spectra. 1989. Vol. 5 (2). Pp. 383–391.

4. *Priya D. S., Cinitha A., Umsha P. K., Iyer N. R.* A critical review on enhancing the seismic response of buildings with energy dissipation methods // Journal of Structural Engineering. 2015. Vol. 42 (3). Pp. 78–88.

5. *Clifton G. C.* Semi-rigid joints for moment resisting steel framed seismic-resisting systems: Ph. D. thesis. Auckland, 2005. 407 p.

6. *Grigorian C. E., Popov E. P.* Energy dissipation with slotted bolted connections. Berkeley, 1994. 255 p.

7. *Clifton G. C., MacRae G. A., Mackinven H., Pampanin S., Butterworth J.* Sliding Hinge Joints and Subassemblies for Steel Moment Frames // Proceedings of the New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference. 2007. Paper 19. 7 p.

8. *Golondrino J. C., MacRae G. A., Chase J. G., Rodgers G. W., Clifton C. G.* Behaviour of asymmetrical friction connections using different shim materials // Proceedings of the New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference. 2012. Paper 100. 7 p.

9. *Boggian F., Tardo C., Aloisio A., Marino E. M., Tomasi R.* Experimental cyclic response of a novel friction connection for seismic retrofitting of RC buildings with CLT panels // Journal of Structural Engineering. 2022. Vol. 148 (5). 04022040.

10. *Sano T., Shirai K., Suzui Y., Utsumi Y.* Loading tests of a brace-type multi-unit friction damper using coned disc springs and numerical assessment of its seismic response control effects // Bulletin of Earthquake Engineering. 2019. Vol. 17 (9). Pp. 5365–5391.

11. *Persson B. N. J.* Contact mechanics for randomly rough surfaces // Surface Science Reports. 2006. Vol. 61 (4). Pp. 201–227.

12. *Chernykh A., Belash T., Tsyganovkin V., Kovalevskiy A.* On the possibility of using timber structures

in the construction of high-rise buildings in seismic areas // *Architecture and Engineering*. 2023. Vol. 8 (1). Pp. 60–70. DOI 10.23968/2500-0055-2023-8-1-60-70.

13. Porcu M. C., Bosu C., Gavrić I. Non-linear dynamic analysis to assess the seismic performance of cross-laminated timber structures // *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 19 (4). Pp. 480–493. DOI 10.1016/j.job.2018.06.008.

14. Shen Y.-L., Schneider J., Tesfamariam S., Stierner S. F., Mu Z.-G. Hysteresis behavior of bracket connection in cross-laminated-timber shear walls // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 48. Pp. 980–991. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.050.

15. Aloisio A., Contento A., Boggian F., Tomasi R. Probabilistic friction model for aluminium–steel Asymmetric Friction Connections (AFC) // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 274. 115159.

16. Boggian F., Aloisio A., Tomasi R. Cyclic tests on an innovative friction dissipative device for seismic retrofit with CLT panels // *World Conference on Timber Engineering*. Oslo, 2023. Pp. 3229–3234.

17. Коваль П. С. Несущая способность и деформативность предварительно напряженных многослойных древеснолит при изгибе: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021. 266 с. URL: <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/koval-pavel-sergeevich> (дата обращения: 29.06.2025).

References

1. Belash T. A. *Osobennosti stroitel'stva i ekspluatatsii seysmostoykikh zdaniy* [Features of construction and operation of earthquake-resistant buildings]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya – Bulletin of the St. Petersburg University of Railways*, 2008, no. 4 (17), pp. 5–16. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-stroitel'stva-i-ekspluatatsii-seysmostoykih-zdaniy> (accessed: 20.03.2025).

2. Pall A. S., Marsh C. Response of friction damped braced frames. *Journal of the Structural Division*, 1982, vol. 108 (6), pp. 1313–1323.

3. Fitzgerald T. F., Anagnos T., Goodson M., Zsutty T. Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections. *Earthquake Spectra*, 1989, vol. 5 (2), pp. 383–391.

4. Priya D. S., Cinitha A., Umesha P. K., Iyer N. R. A critical review on enhancing the seismic response of buildings with energy dissipation methods. *Journal of Structural Engineering*, 2015, vol. 42 (3), pp. 78–88.

5. Clifton G. C. *Semi-rigid joints for moment resisting steel framed seismic-resisting systems*. Ph.D. thesis, Auckland, 2005, 407 p.

6. Grigorian C. E., Popov E. P. *Energy dissipation with slotted bolted connections*. Berkeley, 1994, 255 p.

7. Clifton G. C., MacRae G. A., Mackinven H., Pampanin S., Butterworth J. Sliding Hinge Joints and Subassemblies for Steel Moment Frames. *Proceedings of the New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference*, 2007, paper 19, 7 p.

8. Golondrino J. C., MacRae G. A., Chase J. G., Rodgers G. W., Clifton C. G. Behaviour of asymmetrical friction connections using different shim materials. *Proceedings of the New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference*, 2012, paper 100, 7 p.

9. Boggian F., Tardo C., Aloisio A., Marino E. M., Tomasi R. Experimental cyclic response of a novel friction connection for seismic retrofitting of RC buildings with CLT panels. *Journal of Structural Engineering*, 2022, vol. 148 (5), 04022040.

10. Sano T., Shirai K., Suzui Y., Utsumi Y. Loading tests of a brace-type multi-unit friction damper using coned disc springs and numerical assessment of its seismic response control effects. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019, vol. 17 (9), pp. 5365–5391.

11. Persson B. N. J. Contact mechanics for randomly rough surfaces. *Surface Science Reports*, 2006, vol. 61 (4), pp. 201–227.

12. Chernykh A., Belash T., Tsyganovkin V., Kovalevskiy A. On the possibility of using timber structures in the construction of high-rise buildings in seismic areas. *Architecture and Engineering*, 2023, vol. 8 (1), pp. 60–70. DOI 10.23968/2500-0055-2023-8-1-60-70.

13. Porcu M. C., Bosu C., Gavrić I. Non-linear dynamic analysis to assess the seismic performance of cross-laminated timber structures. *Journal of Building Engineering*, 2018, vol. 19 (4), pp. 480–493. DOI 10.1016/j.job.2018.06.008.

14. Shen Y.-L., Schneider J., Tesfamariam S., Stierner S. F., Mu Z.-G. Hysteresis behavior of bracket connection in cross-laminated-timber shear walls. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 48, pp. 980–991. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.050.

15. Aloisio A., Contento A., Boggian F., Tomasi R. Probabilistic friction model for aluminium–steel Asymmetric Friction Connections (AFC). *Engineering Structures*, 2023, vol. 274, 115159.

16. Boggian F., Aloisio A., Tomasi R. Cyclic tests on an innovative friction dissipative device for seismic retrofit with CLT panels. *World Conference on Timber Engineering*. Oslo, 2023, pp. 3229–3234.

17. Koval' P. S. *Nesushchaya sposobnost' i deformativnost' predvaritel'no napryazhennykh mnogoslonykh derevoplit pri izgibe*. Diss. kand. tekhn. nauk [Bearing capacity and deformability of prestressed multilayer woodplates during bending. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2021, 266 p. Available at: <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/koval-pavel-sergeevich> (accessed: 29.06.2025).