

УДК 699.841

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-30-52](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-30-52)

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ЗДАНИЙ ИЗ КАРКАСНО-ОБШИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КАРКАСОМ ИЗ СТАЛЬНЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ОЦИНКОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ: ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

И.Р. ГИЗЯТУЛЛИН

Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко
АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Рассмотрены особенности поведения, достоинства и недостатки различных типов каркасно-обшивных стеновых конструкций с каркасом из стальных холодногнутох оцинкованных профилей при действии на них нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия. Показана актуальность исследования и обозначены проблемы, ограничивающие широкое распространение зданий из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), возводимых в сейсмоопасных районах Российской Федерации.

Материалы и методы. Анализируются нормативные требования различных стран к расчету и проектированию зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных районах, отечественные и зарубежные публикации с результатами ранее выполненных экспериментальных исследований. Используются систематизация, структурный, сравнительный и сопоставительный анализы, теоретическое обобщение материалов, полученных при детальном анализе отечественных и зарубежных нормативно-технических документов, а также литературных источников, содержащих информацию о результатах экспериментальных исследований каркасно-обшивных конструкций зданий на основе ЛСТК при действии на них нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия.

Результаты. Представлен краткий обзор и анализ действующих отечественных и зарубежных нормативно-технических документов и результатов выполненных исследований в области расчета и проектирования зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных районах. Рассмотрены и обобщены результаты последних достижений в области экспериментальных исследований несущих и ненесущих каркасно-обшивных конструкций зданий из ЛСТК, а также элементов соединений при действии на них нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия, чтобы продемонстрировать текущий прогресс, проблемы и будущие направления исследований. Отмечены различия в действующих нормативно-технических документах США и Канады в части назначения коэффициентов редуцирования сейсмических нагрузок, а также отставание европейского и отечественного нормативного документа в части регламентации требований к расчету и проектированию зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмических районах.

Выводы. Представленные данные подтверждают необходимость теоретических и экспериментальных исследований, разработки и совершенствования нормативно-технических документов, которые позволят повысить надежность и механическую безопасность зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК и значительно расширить их распространение в сейсмоопасных районах России.

Ключевые слова: легкие стальные тонкостенные конструкции, каркасно-обшивные конструкции, сейсмостойкость, коэффициент допускаемых повреждений, испытания, экспериментальные исследования

Для цитирования: Гизиятуллин И.Р. Сейсмостойкость зданий из каркасно-обшивных конструкций с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей: обзор и анализ современного состояния вопроса // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 30–52. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-30-52](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-30-52)

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

SEISMIC RESISTANCE OF FRAME-CLADDING BUILDINGS HAVING COLD-FORMED GALVANIZED STEEL CONSTRUCTION: REVIEW AND ANALYSIS OF CURRENT STATUS

I.R. GIZIATULLIN

Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. The behaviors, advantages, and disadvantages of various types of frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel constructions under loads simulating seismic effects are considered. The paper stresses the relevance and demonstrates the problem of the widespread use of light gauge steel framing structures (LGSFS) in earthquake-prone areas in the Russian Federation.

Materials and methods. Normative requirements in different countries for calculating and designing frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel constructions erected in earthquake-prone areas, as well as domestic and foreign literature, were analyzed, using structural, comparative, and matching analyzes, systematization, and theoretical generalization of obtained.

Results. A brief review and analysis of current domestic and foreign standard technical documents, as well as research findings in the field of the calculation and design of frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel constructions erected in earthquake-prone areas, are presented. The recent advances in studying load-bearing and non-load-bearing frame-cladding cold-formed galvanized steel structures and joint elements under simulated seismic loads were reviewed and summarized in order to demonstrate current progress, challenges, and prospects for future research. Differences in current standard technical documents used in the USA and Canada concerning seismic load reduction coefficients, as well as the weaknesses of the European and domestic normative documents in terms of regulating requirements for calculating and designing frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel constructions, erected in seismic areas, were addressed.

Conclusions. The presented data confirm the necessity of theoretical and experimental research and development and improvement of standard technical documents. These documents will allow the reliability and mechanical safety of frame-cladding buildings having cold-formed steel constructions to be improved and their distribution in earthquake-prone areas of Russia to be significantly extended.

Keywords: light gauge steel framing structures, frame-cladding structures, seismic resistance, seismic force reduction factor, tests, experimental studies

For citation: Giziattullin I.R. Seismic resistance of frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel construction: review and analysis of current status. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 30–52 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-30-52](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-30-52)

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the work on the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Введение

Успех применяемых в строительстве зданий и сооружений материалов, конструкций и технических решений, как правило, зависит от способности удовлетворять потребности рынка, который все больше ориентируется на решения, характеризующиеся экономической эффективностью, скоростью возведения, энергоэффективностью и экологическими показателями производства конструкций, возведения строения и его сноса (утилизации).

Конструктивные системы зданий с применением каркасов из ЛСТК на основе стальных холодногнутох оцинкованных профилей достаточно давно востребованы на рынке строительства, но в кризисные времена, как показала пандемия COVID-19, технология сухого и быстровозводимого строительства с использованием ЛСТК оказалась особенно актуальной. По этим причинам конструктивные системы зданий и сооружений на основе ЛСТК переживают бум на протяжении многих лет как в области их применения для несущих конструкций, так и для ненесущих и самонесущих конструкций, и прежде всего для строительства зданий и сооружений в сейсмоопасных районах, где легкость играет одну из ключевых ролей в обеспечении их сейсмостойкости.

Использование холодногнутох стальных элементов в строительстве зданий началось в 1850-х годах как в США, так и в Великобритании. В 1920-х и 1930-х годах применение холодногнутой стали в качестве строительного материала все еще было ограниченным, поскольку в строительных нормативно-технических документах не было норм и правил проектирования несущих конструкций с использованием холодногнутох стальных тонкостенных элементов. Идея использования холодногнутой листовой стали для возведения стальных каркасов зданий массового рынка малоэтажного строительства существовала в течение долгого времени. Началом применения холодногнутох стальных элементов можно считать конец XIX и первую половину XX века [1]. Современная эпоха после Второй мировой войны началась с обилия мощностей по производству листовой стали и желания преобразования этих мощностей с военных на общегражданские цели. Сталелитейные заводы в США через Американский институт чугуна и стали (American Iron and Steel Institute (AISI)) профинансировали исследования, которые провел George Winter в Корнельском университете (Cornell University) [3, 4], в целях разработки технических условий для проектирования

легких холодногнутых стальных строительных конструкций. Эти усилия привели к появлению в 1946 г. технических условий AISI для проектирования легких холодногнутых стальных строительных конструкций [2], которые впоследствии были приняты в строительных нормативно-технических документах и, в результате различных итераций, легли в основу стандарта AISI S100-16 [10], регламентирующего требования к расчету и проектированию зданий и сооружений на основе легких холодногнутых стальных элементов.

В настоящее время в Российской Федерации происходит рост использования каркасов из ЛСТК на основе стальных холодногнутых оцинкованных профилей в строительстве зданий, но широкому их применению препятствует отсутствие норм проектирования зданий, возводимых в сейсмоопасных районах. В обзорной статье [8] авторы обращают внимание на отсутствие в действующих на тот момент нормах Российской Федерации указаний, касающихся расчета и особенностей проектирования зданий из ЛСТК в сейсмических районах. Отмечается важность проведения дополнительных экспериментальных исследований зданий, возводимых с применением указанной технологии, и уточнения методов их расчета на сейсмические воздействия.

В этом контексте в настоящей статье рассматривается технология строительства зданий на основе каркасов из ЛСТК с применением стальных холодногнутых оцинкованных профилей по принципу каркасно-обшивных конструкций и приводится краткий обзор последних исследований работы несущих и ненесущих каркасно-обшивных конструкций зданий из ЛСТК при действии нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия. Технология ЛСТК, кроме каркасно-обшивных конструкций, также представлена рамными конструкциями (стержневые горизонтальные и вертикальные элементы – балки и колонны, объединенные в общий пространственный каркас здания), возводимыми по принципу стальных каркасов из горячекатаного металлопроката, которые в данной работе не рассматриваются.

Соппротивление сейсмическому воздействию каркасно-обшивных конструкций стен зданий из ЛСТК обеспечивается с помощью различных систем: крестообразной связи из стальных лент, панелей наружной и внутренней обшивок, смешанных решений, совмещающих применение связей и панелей обшивок.

Как в системах сопротивления сейсмическим силам с крестообразными связями, так и в системах сопротивления сейсмическим силам с обшивкой, в сейсмической реакции каркасно-обшивных конструкций стен зданий из ЛСТК преобладает высокая деградация прочности и жесткости (рис. 1).

На рис. 1 видно, что каркасно-обшивные конструкции стен зданий из ЛСТК с крестообразными связями демонстрируют более высокую начальную линейную жесткость, в то время как каркасные конструкции стен из ЛСТК с панелями обшивок из ГКЛ характеризуются существенным нелинейным поведением. В каркасных конструкциях стен из ЛСТК с крестообразными связями рассеивание энергии сейсмического воздействия происходит за счет деформирования (растяжение–сжатие) связей и развития в них пластических деформаций, в то время как в конструкциях стен из ЛСТК с панелями обшивок рассеивание энергии сейсмического воздействия происходит за счет деформации соединений обшивок и каркаса, а также повреждения панелей обшивок. При сопротивлении сейсмическим силам оба конструктивных решения испытывают существенное снижение прочности и жесткости. Однако, несмотря на их слабую гистерезисную реакцию по сравнению с традиционными

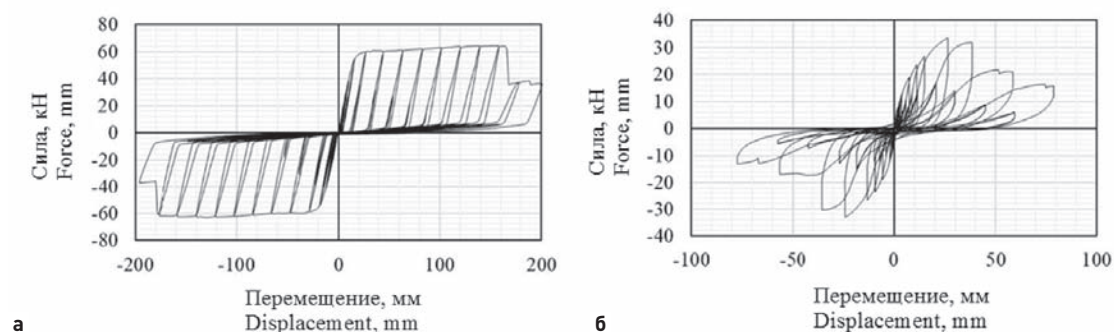


Рис. 1. Гистерезисный отклик типовых конструктивных систем, выполненных по технологии ЛСТК

на основе стального каркаса из холодногнутых профилей: а – поведение каркаса конструктивной системы с крестообразными связями [5]; б – поведение каркаса конструктивной системы с обшивкой из гипсокартонных листов (ГКЛ) [6]

Fig. 1. Hysteresis response of typical LGSFS structural systems based on a cold-formed steel construction: а – behavior of frame of structural system having cross bracing [5]; б – behavior of frame of structural system having plasterboard cladding [6]

стальными каркасами на основе горячекатаного проката, стальные каркасы зданий из ЛСТК, в основном из-за их легкости, могут быть конкурирующей альтернативой для строительства малоэтажных зданий и зданий средней этажности в сейсмоопасных районах.

Материалы и методы

Данное исследование является результатом выполненной автором, с целью обзора, демонстрации текущего прогресса, проблем и будущих направлений исследований, работы, связанной с поиском и анализом действующих отечественных и зарубежных нормативно-технических документов, а также литературных источников, содержащих информацию о результатах экспериментальных исследований каркасно-обшивных конструкций зданий с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей при действии на них нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия. Для достижения поставленной цели был выполнен анализ действующих нормативно-технических документов различных стран и литературный обзор результатов экспериментальных исследований несущих и ненесущих каркасно-обшивных стеновых конструкций, конструкций дисков перекрытий (покрытий) с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей, а также элементов соединений элементов каркаса и различных типов обшивок при действии на них нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия. Информация, полученная в ходе работы, систематизирована и структурирована, основные тезисы представлены в данной статье.

Результаты

Анализ нормативно-технических документов

Технология ЛСТК на российском рынке гражданского строительства появилась в 1990-х годах. Несмотря на то что технология ЛСТК была внедрена в практику строительства более 20 лет назад, система нормативно-технических документов в Российской

Федерации, регламентирующая технические требования и правила проектирования каркасов из ЛСТК, появилась только после 2016 г. с вступлением в силу СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов» [7], область применения которого не распространяется на проектирование зданий из ЛСТК, возводимых в сейсмических районах. В России нормативным документом, устанавливающим нормы и правила проектирования зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах, является СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*» [8], при этом данный свод правил также не устанавливает требования к расчету и проектированию зданий из ЛСТК.

За границей целенаправленные массовые исследования поведения конструктивных решений зданий из ЛСТК, возводимых в сейсмических районах, сопровождающиеся выпуском нормативно-технических документов, были начаты в конце 1970-х годов.

Нормы и правила проектирования зданий из ЛСТК, возводимых в сейсмических районах, уже установлены в североамериканском стандарте по сейсмическому проектированию зданий из ЛСТК (AISI S400 [11]), которые в настоящее время приняты в США, Канаде и Мексике. Стандарт распространяется на следующие конструктивные решения зданий из ЛСТК: с применением каркасно-обшивных конструкций с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с панелями обшивок из деревянных конструкционных панелей, стального листа или гипсокартона; каркасов с крестообразными связями из стальных лент, а также рамных каркасов с болтовыми соединениями (по принципу стальных каркасов на основе горячекатаного металлопроката).

AISI S400 предусматривает выбор механизмов рассеивания энергии диссипативных элементов конструктивной системы зданий из ЛСТК, устанавливает требования по сверхпрочности (*overstrength factor*) в отношении недиссипативных элементов конструктивной системы, а требования по использованию коэффициентов модификации отклика (ответа), учитывающих присущие конструктивной системе здания резервы прочности и пластичности.

Традиционный подход обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений реализуется посредством соблюдения правил проектирования и конструирования, нацеленных на создание в определенных элементах зон упругопластического деформирования, обеспечивающих пластичность и рассеивающую работу всей конструктивной системы в целом. Наличие пластических механизмов рассеивания энергии является фундаментальным требованием, предъявляемым к рассеивающим конструктивным системам.

В результате развития в конструктивной системе здания или сооружения пластических деформаций в процессе проектирования можно учесть снижение (редуцирование) сейсмических нагрузок. В методологии СП 14.13330.2018 снижение достигается умножением сейсмических нагрузок, полученных в результате линейного анализа, на коэффициент K_1 . Этот коэффициент позволяет учитывать нелинейный отклик здания или сооружения, связанный с материалом, конструктивной системой и процедурами проектирования, и выражается как коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений, принимаемый по таблице 5.2 СП 14.13330.2018.

Нормативные документы США ASCE 7 [12], Канады NBCC [13] и Еврокода EN 1998-1 [14] также содержат коэффициенты редуцирования сейсмических нагрузок.

Таблица 1

**Коэффициенты R регламентируемые для зданий с применением каркасов из ЛСТК
в соответствии с ASCE 7 [12] и NBCC [13]**

Table 1

Coefficients R regulated for LGSFS frame buildings following ASCE 7 [12] and NBCC [13]

№ п.п	Тип конструктивного решения	Коэффициент R, регламентируемый ASCE 7 [12]	Коэффициент R, регламентируемый NBCC [13]
1	Каркасно-обшивные конструкции с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с панелями обшивок из деревянных конструкционных панелей	от 6.5 до 7	4.25
2	Каркасно-обшивные конструкции с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с панелями обшивок из стального листа	от 6.5 до 7	2.6
3	Каркасно-обшивные конструкции с каркасом с крестообразными связями из стальных лент	4	2.47
4	Рамные каркасы с болтовыми соединениями (по принципу стальных каркасов на основе горячекатаного металлопроката)	3.5	–
5	Каркасно-обшивные конструкции с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с панелями обшивок из гипсокартона с одной стороны и из деревянных конструкционных панелей с другой	–	2.55
6	Каркасно-обшивные конструкции с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с панелями обшивок из гипсокартона или древесноволокнистой плиты	от 2 до 2.5	–

В Еврокоде EN 1998-1 [14] данный коэффициент обозначается как коэффициент q (behaviour factor), а в нормах США и Канады – как коэффициент R (response-modification factor).

При определении коэффициентов R, регламентируемых для зданий из ЛСТК, североамериканский стандарт AISI S400 [11] ссылается к ASCE 7 [12] для проектирования зданий, возводимых в США и Мексике, а также NBCC [13] для проектирования зданий, возводимых в Канаде. Значения соответствующих коэффициентов приведены в табл. 1.

В Еврокоде по сейсмическому проектированию EN 1998-1 [14] отсутствуют требования, посвященные проектированию зданий из ЛСТК. При этом, согласно действующей редакции технических требований европейского документа, проектирование зданий с каркасно-обшивочными конструкциями стен из ЛСТК с крестообразными связями и каркасов с обшивками из стального листа, может быть выполнено, при условии если рассматривать их в качестве традиционных стальных каркасов на основе горячекатаного проката, изготовленных с сечением класса 4, и рассмотрения конструктивных систем из них как стальных каркасов низкого уровня пластичности *DCL* (ductility class low) с низкой рассеивающей способностью. В этом случае коэффициент поведения *q*, принятый в европейских нормах и имеющий согласованность с коэффициентом *R*, может быть принят не более 1,5. Следует отметить, что проектирование в соответствии с этим принципом рекомендуется только для регионов с низкой сейсмичностью. Проектирование каркасно-обшивочных конструкций стен из ЛСТК с панелями обшивок из других материалов при использовании действующего Еврокода EN-1998-1 [14] не представляется возможным.

Краткий обзор выполненных исследований

Экспериментальные исследования по изучению поведения каркасно-обшивных конструкций зданий из ЛСТК под действием сейсмических нагрузок начались в конце 80-х гг. – начале 90-х гг. В работах под руководством С.А. Адхама [15, 16] были проведены экспериментальные исследования по оценке прочности и деформативности каркасно-обшивных конструкций стен зданий из ЛСТК с крестообразными связями и обшивками из гипсокартонных листов при сдвиговых (в плоскости каркаса) циклических нагрузках. Всего было испытано шесть образцов размером $2,4 \times 2,4$ м. В ходе экспериментальных исследований наблюдалось предположаемое соответствие между увеличением площади стальных лент связей и увеличением их вклада в общую несущую способность каркаса при средних и высоких значениях перекоса. Сдвиговая жесткость каркаса для стабилизированного цикла снизилась примерно на 7–15 % по сравнению со сдвиговой жесткостью соответствующего начального цикла. Деградация сдвиговой жесткости увеличивалась по мере увеличения величины перекоса каркаса. Способность каркаса рассеивать энергию в стабилизированном цикле составляла около 60 % от начального цикла.

В предыдущие годы испытания фрагментов и моделей зданий из ЛСТК с применением сейсмоплатформ выполнялись в США и Европе, хотя первый эксперимент был проведен в Австралии [17]. Исследование содержало обширную программу динамических испытаний как двух-, так и трехмерных конфигураций каркаса здания из ЛСТК. По результатам экспериментальных исследований был оценен вклад ненесущих элементов, в частности, облицовки из гипсокартонных панелей, сделан вывод, что стальные каркасы из ЛСТК хорошо сопротивляются сейсмическим нагрузкам, гипсокартонная обшивка при этом вносит вклад в сдвиговую жесткость основного каркаса.

Более масштабные исследования проводились в США, в рамках проекта «CFS-NEES», и включали испытания на сейсмоплатформе двухэтажного натурного экспериментального образца здания, конструкции стен и перекрытий которого были обшиты ориентированно-стружечными плитами (ОСП) [18–28]. Размеры экспериментального образца здания составили $7,0 \times 15,2$ м в плане и 5,9 м в высоту. Испытания проводились в два основных этапа как показано на рис. 2. Экспериментальные образцы зданий для испытаний в соответствии с этапами 1 и 2 были запроектированы с номинально идентичной конструктивной системой. Экспериментальный образец здания для испытаний по этапу 1 не включал каких-либо ненесущих конструкций и был возведен только с несущими элементами, обеспечивающими сопротивление сейсмической нагрузке. Экспериментальный образец здания для испытаний по этапу 2 был возведен с учетом ненесущих конструкций, включая наружную обшивку из панелей ОСП, внутреннюю обшивку из гипсокартонных листов, лестницы, внутренние перегородки и наружный облицовочный слой фасадов из армированным стекловолокном гипсовых панелей.

Испытание по этапу 2 было разделено на стадии строительства, для которых выполнялись низкоамплитудные испытания. Общей целью проекта «CFS-NEES» было развитие понимания о динамическом поведении конструктивной системы здания из ЛСТК при действии сейсмических нагрузок для улучшения методологической основы их проектирования. По результатам анализа экспериментальных исследований поперечная жесткость здания оказалась выше в 4 раза при учете конструкций стен, не предназначенных для восприятия

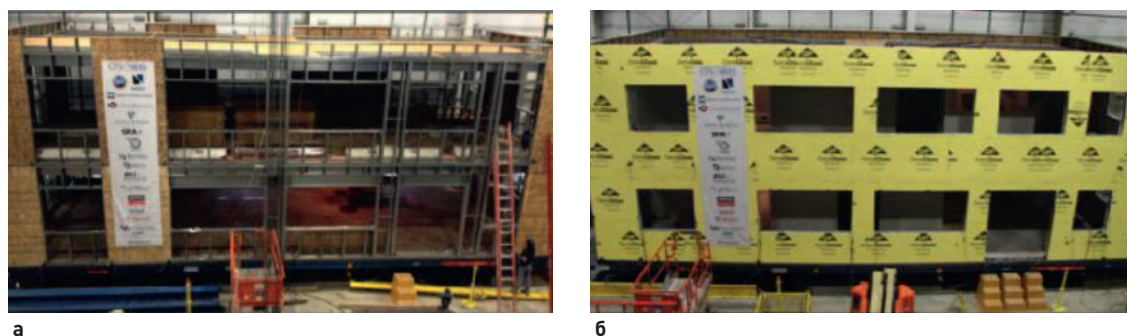


Рис. 2. Полномасштабные испытания экспериментального образца здания проекта «CFS-NEES»: а – общий вид экспериментального образца здания на этапе 1; б – общий вид экспериментального образца здания на этапе 2 [18]
Fig. 2. Full-scale tests of CFS-NEES building prototype: а – general view of building prototype, stage 1; б – general view of building prototype, stage 2 [18]

сейсмических нагрузок, и в 4,5 раза – при учете несущих элементов и конструкций здания. В целом, жесткость испытываемого фрагмента здания оказалась в 18 раз выше, чем численная модель этого здания, основанная только на несущих конструкциях, воспринимающих сейсмические воздействия.

В Калифорнийском университете в Сан-Диего были проведены исследования сейсмического поведения шестизэтажного здания (рис. 3), каркасы стен которого были обшиты с одной стороны стальными листами, а с другой стороны – гипсокартонными панелями [29, 30].

В рамках трехнедельной программы экспериментальных исследований здание подверглось 7 испытаниям сейсмической нагрузкой с возрастающей амплитудой колебаний, а также воздействию пожара с последующими испытаниями на сейсмические воздействия. Амплитуды колебаний были приняты, исходя из предъявляемых требований к эксплуатационной пригодности, конструктивной целостности и общей устойчивости здания при различных уровнях сейсмического воздействия. Впоследствии на двух выбранных этажах здания, получивших повреждения после первичных испытаний, были проведены огневые испытания. По результатам огневых испытаний здание было подвергнуто двум испытаниям на сейсмические нагрузки, соответствующие воздействию, имитирующему афтершок с малой амплитудой колебаний, и воздействию с максимальной амплитудой колебаний, имитирующему основное сейсмическое событие.

В Италии, в рамках европейского проекта «ELISSA», были проведены исследования, включающие испытания на сейсмоплатформе полномасштабного двухэтажного здания (рис. 4) с облицовкой конструкций стен гипсовыми панелями [31]. По результатам данных исследований было установлено, что динамические характеристики здания были значительно изменены с включением в работу отделочных ограждающих конструкций здания. Снижение основного периода собственных колебаний здания произошло ориентировочно на 20 %, что, по оценке авторов работы, соответствует увеличению сдвиговой жесткости здания примерно в 4,5 раза.

В рамках проекта «LAMIEREDIL» [31, 32] была проанализирована сейсмическая реакция двух трехэтажных моделей зданий в масштабе 1:3, выполненных из ЛСТК с ленточными крестообразными связями (рис. 5). Опытные образцы различались конструктивным решением перекрытий: для первого типа образца были выполнены сталежелезобетонные перекрытия по профлисту, для второго типа образца были выполнены перекрытия с обшивкой

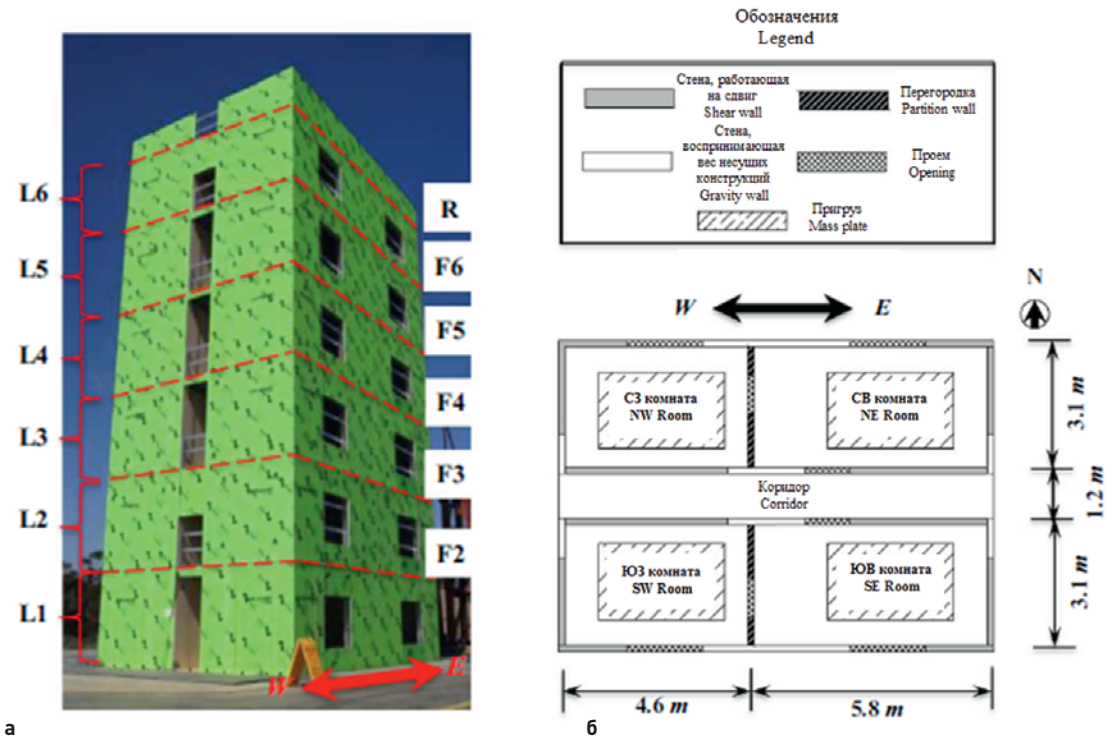


Рис. 3. Экспериментальный образец здания из ЛСТК: *а* – фотография образца здания на сейсмоплатформе; *б* – типовой план этажа здания [29]

Fig. 3. LGSFS building prototype: *a* – photo of building prototype on shake table; *b* – typical floor plan of building [29]

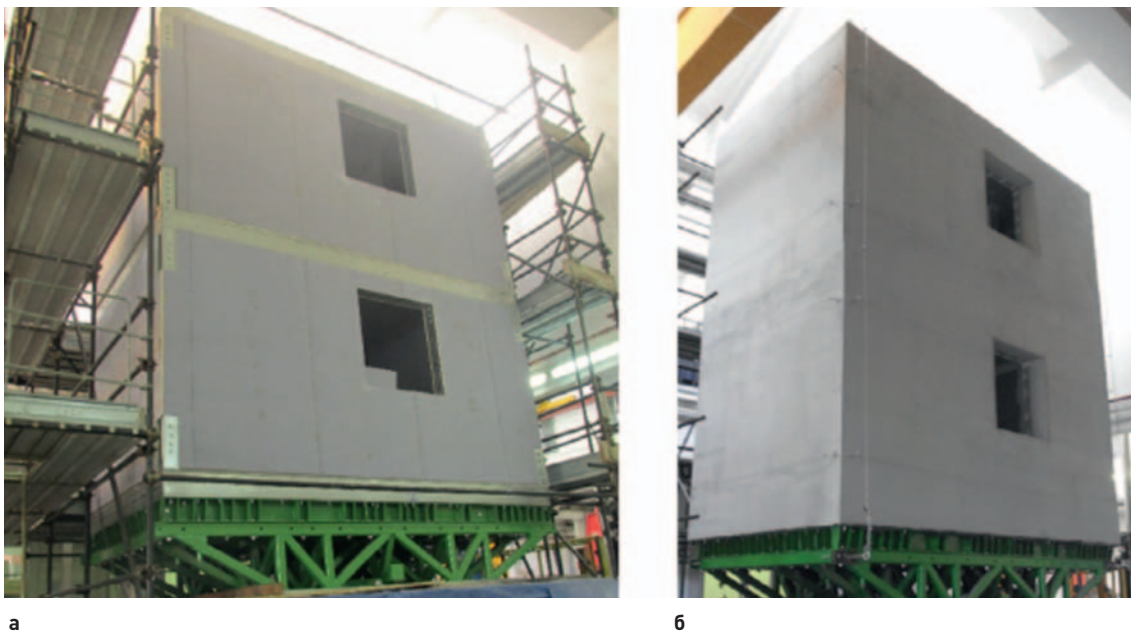


Рис. 4. Полномасштабные испытания экспериментального образца здания проекта «ELISSA»: *а* – первая фаза (неполная конструктивная система); *б* – вторая фаза (полная конструктивная система) [31]

Fig. 4. Full-scale tests of ELISSA building prototype: *a* – first stage (incomplete structural system); *b* – second stage (complete structural system) [31]

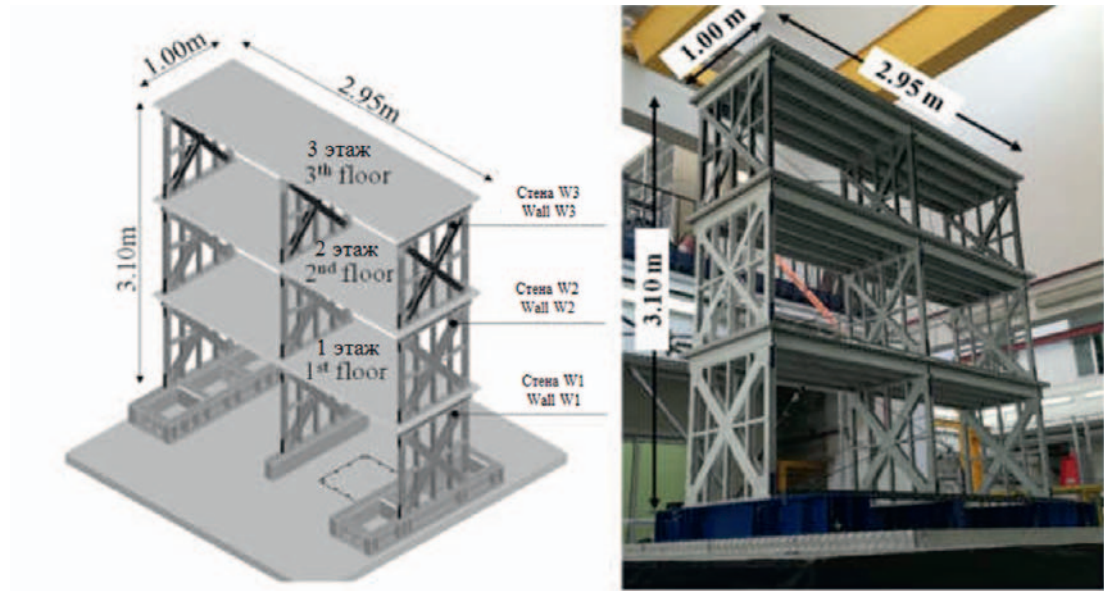


Рис. 5. Полномасштабные испытания экспериментального образца «LAMIEREDIL» [31]
Fig. 5. Full-scale tests of LAMIEREDIL prototype [31].

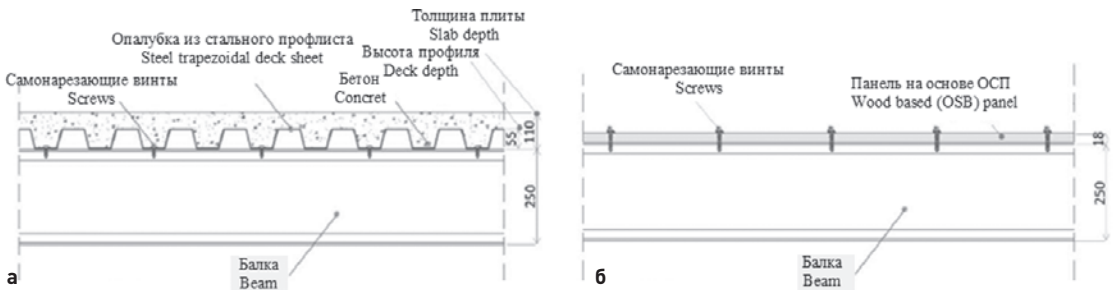
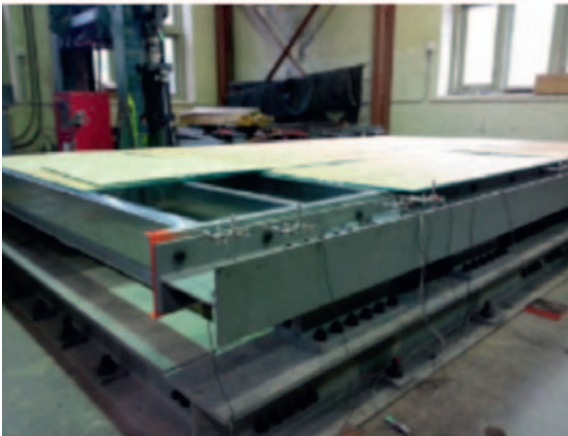


Рис. 6. Конструкция полов экспериментального образца «LAMIEREDIL» (размеры в мм) [32]:
а – стале-железобетонное перекрытие по профлисту (образец первого типа); б – перекрытие с обшивкой ОСП панелями (образец второго типа)

Fig. 6. LAMIEREDIL floor prototype [dimensions in mm] [32]: а – composite floor having steel profiled sheeting (sample 1); б – floor having OSB cladding (sample 2)

ОСП панелями толщиной 18 мм (рис. 6). Исследование проводилось на сеймоплатформе, результаты испытаний показали, что глобальная реакция конструктивной системы была почти линейной для обоих образцов в рамках проектных уровней сейсмического воздействия. Для испытаний с более высокой интенсивностью сейсмического воздействия глобальная реакция системы отклонялась от линейной, образец получал повреждения, идентифицируемые при визуальном осмотре конструкций (деформации ленточных крестообразных связей, ослабление соединений).

Меньшее количество работ посвящено исследованию горизонтальных диафрагм жесткости (дисков перекрытий (покрытий) из ЛСТК, о чем свидетельствуют немногочисленные



а



б

Рис. 7. а – образец горизонтальной диафрагмы (перекрытия) с обшивкой из деревянных конструктивных панелей [34]; б – образец горизонтальной диафрагмы (перекрытия) со стальным настилом [35]

Fig. 7. а – sample of horizontal floor diaphragm having timber structural panel cladding [34]; б – sample of horizontal floor diaphragm having steel deck [35]

исследования, проведенные в Канаде на диафрагмах, обшитых деревянными конструктивными панелями (рис. 7, а), с различными конструктивными решениями и слоями отделочного материала [33, 34], а также диафрагм со стальным настилом (рис. 7, б) в Италии [35].

Активные исследования ведутся в области исследования соединений элементов каркаса между собой. Данные соединения можно сгруппировать на два вида: соединения сталь–сталь и соединения сталь–панель обшивки. Экспериментальные значения характеристик соединений между панелями обшивок и сталью имеет решающее значение для каркасно-обшивных конструкций, где материал обшивок и их соединений оказывают большое влияние на глобальную сейсмическую реакцию здания. В США исследовались соединения обшивок из деревянных конструктивных и гипсокартонных панелей [36–38], в Китае проводились исследования соединений обшивок из деревянных конструктивных, гипсокартонных, стекломагниевых и кальциево-силикатных панелей [39], в Италии исследовались соединения обшивок из гипсокартонных панелей [40, 41]. По результатам исследований установлено, что материал обшивки оказывает значительное влияние на сдвиговую реакцию соединения. Для соединений каркаса ЛСТК с обшивкой из деревянной конструктивной панели, которые демонстрируют большую прочность и способность рассеивать энергию, преобладающим видом разрушения является сквозное протягивание саморезов через зону соединения элементов (рис. 8, а), а также растрескивание панели обшивки по толщине (рис. 8, б).

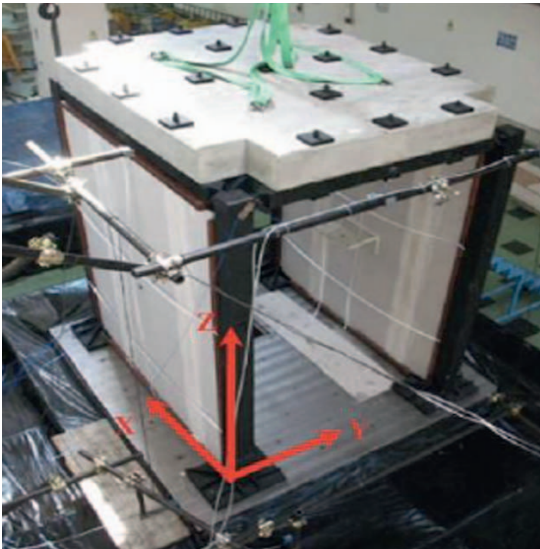
Активные работы ведутся и в области исследования поведения ненесущих конструкций из ЛСТК. Проведены испытания двухэтажного стального каркасного здания с перегородками и потолочными системами из ЛСТК (рис. 9, а) [43, 44], пятиэтажного железобетонного здания с конструкциями фасадов и перегородок из ЛСТК (рис. 9, б) [45], одноэтажных конструкций с перегородками (рис. 10, а) [46], перегородками и подвесными потолочными системами из ЛСТК (рис. 10, б) [46].



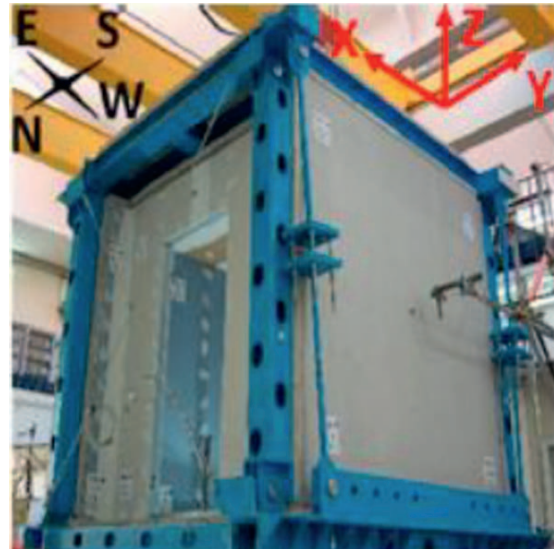
Рис. 8. Наблюдаемые виды отказов [42]: *а* – сквозное протягивание саморезов через зону соединения элементов; *б* – растрескивание панели обшивки по толщине
Fig. 8. Observed failure modes [42]: *a* – protruding self-tapping screw through element joint area; *b* – cladding panel cracking over thickness



Рис. 9. Экспериментальные образцы моделей и фрагментов зданий с ненесущими конструкциями из ЛСТК, испытанных на сейсмоплатформах: *а* – двухэтажное здание со стальным каркасом, включающее перегородки и потолочные системы из ЛСТК [43]; *б* – пятиэтажное железобетонное здание, включающее перегородки и фасадные системы [45]
Fig. 9. Experimental models and fragments of buildings with non-load-bearing LGSFS structures tested on shake table: *a* – e two-storey building having steel frame including LGSFS partition walls and ceiling systems [43]; *b* – five-storey reinforced concrete building including partition walls and facade systems [45]



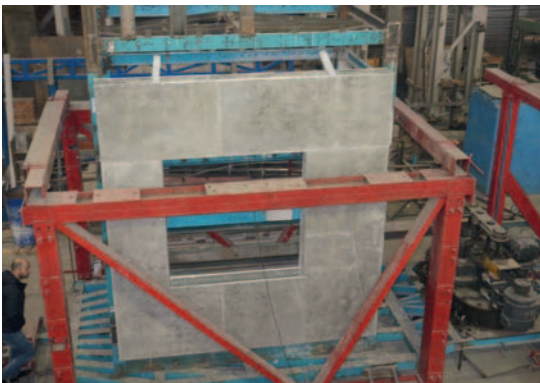
а



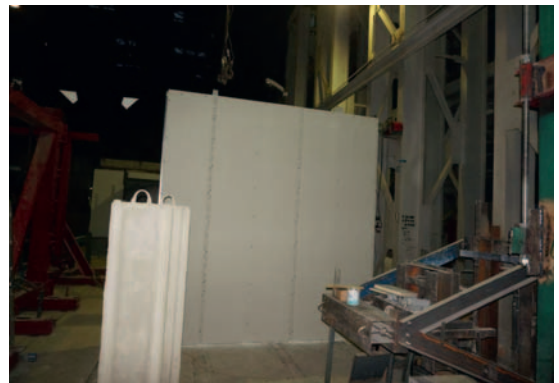
б

Рис. 10. Экспериментальные образцы моделей и фрагментов зданий с ненесущими конструкциями из ЛСТК, испытанных на сейсмоплатформах: а – одноэтажный фрагмент здания, включающий перегородки [46]; б – одноэтажный фрагмент здания, включающий перегородки и подвесные потолки [47]

Fig. 10. Experimental models and fragments of buildings with non-load-bearing LGSFS structures tested on shake table: а – single storey building fragment including partition walls [46]; б – single storey building fragment including partition walls and suspended ceilings [47]



а



б

Рис. 11. а – экспериментальный образец фасадной панели в процессе динамических испытаний; б – общий вид силовой рамы для испытаний на перекос образца фасадной панели

Fig. 11. а – prototype of facing panel during dynamic testing; б – general view of load frame for warping tests of facing panel sample.

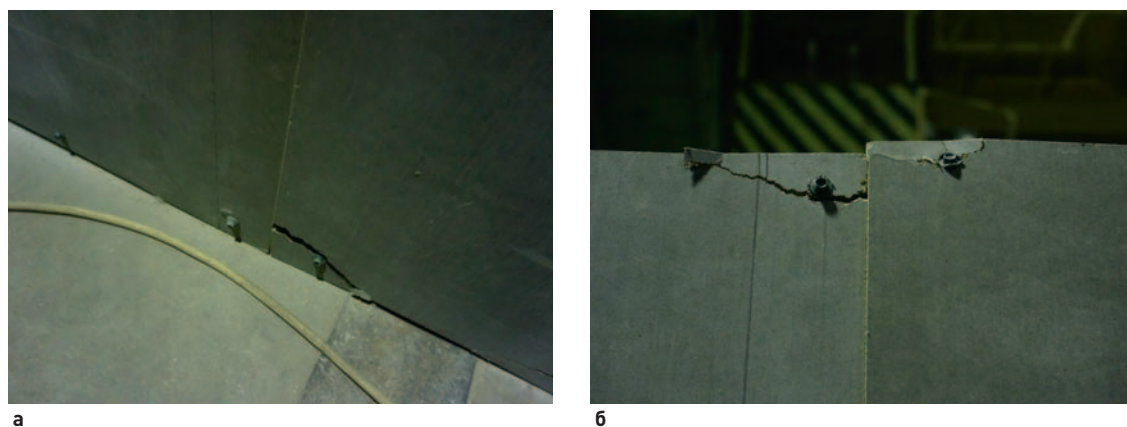


Рис. 12. Характер разрушения цементно-стружечной плиты в зоне: а – нижнего стыка соединения обшивок к стальному каркасу; б – верхнего стыка соединения обшивок к стальному каркасу
Fig. 12. Failure behavior of cement-bonded particle board: а – in lower joint of cladding to steel frame; б – in upper joint of cladding to steel frame.

Основными целями данных исследований была оценка сейсмического поведения ненесущих конструкций зданий, выполненных из ЛСТК при действии сейсмических нагрузок, а также оценка влияния различных конструктивных параметров на их сейсмостойкость. Испытанные гипсокартонные перегородки и подвесные потолочные системы демонстрируют хорошее сейсмическое поведение как в плоскости конструкции, так и из ее плоскости.

В Российской Федерации также ведутся активные исследования в данном направлении. На базе Центра исследований сейсмостойкости сооружений (ЦИСС) ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко проведены экспериментальные исследования навесных каркасно-обшивных конструкций фасадных панелей при действии статических и динамических нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия интенсивностью 7–9 баллов по шкале MSK-64 (рис. 11) [48]. Экспериментальные исследования предусматривали проведение испытаний фасадных панелей из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с обшивками из гипсокартонных листов марки «Гуркос Стронг» толщиной 12,5 мм и цементно-стружечных плит (ЦСП) марки «Тамак» толщиной 12 мм.

Для оценки сдвигового сопротивления и предельных перекосов фасадных панелей были проведены испытания на сдвиговые статические нагрузки в плоскости панели (рис. 11, б). По результатам испытаний на статическую нагрузку был установлен качественный и количественный характер сдвигового сопротивления фасадных панелей, механизм отказа каркасно-обшивной конструкции и характер повреждения панелей обшивок (рис. 12) при различных значениях величины перекоса фасадных панелей.

По результатам динамических испытаний фасадной панели механическая безопасность, конструктивная целостность и эксплуатационная пригодность панели не была нарушена.

Специалистами ЦИСС ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко при поддержке Ассоциации развития стального строительства (АРСС) выполнена обширная программа экспериментальных исследований различных типов конструктивных решений каркасно-обшивных конструкций стеновых панелей с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с одно- и двухслойными обшивками из ЦСП толщиной 10 и 20 мм соответственно, шагом закрепления панелей



Рис. 13. Общий вид экспериментальных образцов стеновых панелей из ЛСТК: а – с вертикальной X-образной связью; б – с однослойной наружной панелью обшивки из ЦСП толщиной 10 мм; в – с двухслойной наружной панелью обшивки из ЦСП толщиной 20 мм

Fig. 13. General view of prototype LGSFS wall panels: а – vertical X-joint; б – single-layer exterior 10 mm CBPB cladding; в – double-layer exterior 20 mm CBPB cladding

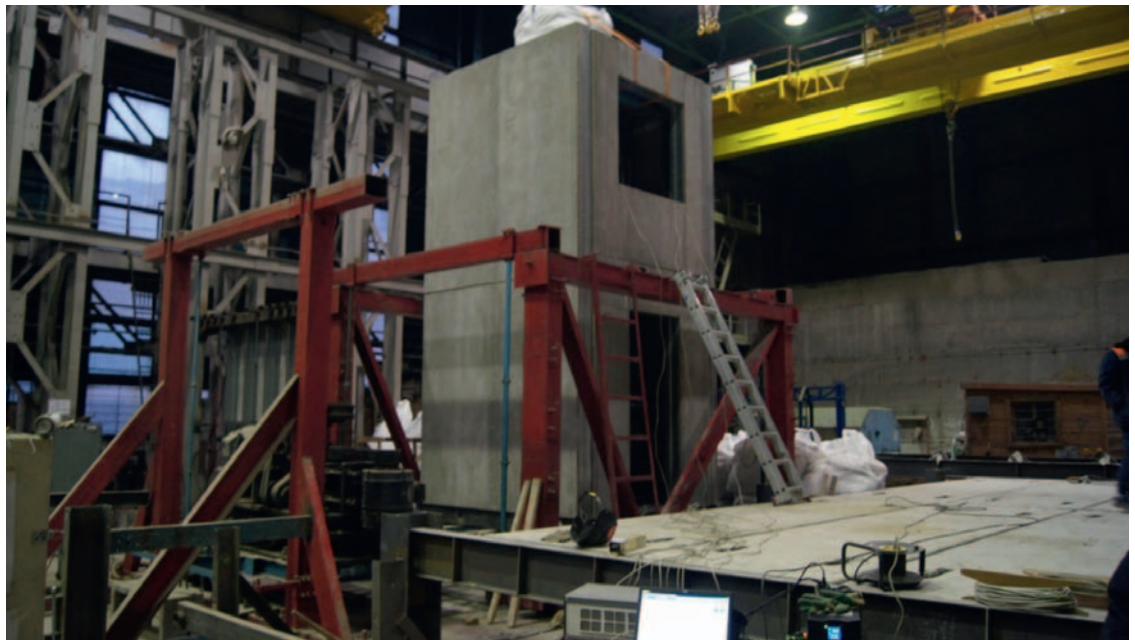


Рис. 14. Общий вид экспериментального образца двухэтажного фрагмента здания из ЛСТК

Fig. 14. General view of prototype two-storey LGSFS building fragment

обшивок к каркасу 150 и 300 мм, а также каркасно-обшивных конструкций стеновых панелей с вертикальной X-образной связью из стальных оцинкованных лент (рис. 13). Испытания предусматривали образцы конструкций каркаса из стальных холодногнутых оцинкованных профилей наружной несущей стеновой панели с габаритными размерами (без учета толщины обшивок) $3000 \times 2400 \times 200$ мм (В $\times$ Ш $\times$ Т). Также программа работ предусматривала оценку общего динамического поведения конструктивного решения здания из ЛСТК на образце фрагмента двухэтажного здания вибрационным (резонансным) методом, позволяющим измерить количественно силовую нагрузку, имитирующую сейсмическое воздействие в широком диапазоне частот (рис. 14). Результаты настоящих экспериментальных исследований готовятся к публикации.

Настоящая работа была ориентирована на получение результатов, позволяющих сформулировать базовые требования к расчету и проектированию зданий из каркасно-обшивных конструкций на основе стального каркаса из холодногнутых профилей для исключения существующих барьеров по расчету и проектированию таких зданий в сейсмоопасных районах России. Полученные результаты могут быть использованы при разработке нормативно-технических и организационно-методических документов, в частности, при подготовке изменений к СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах», в части расчета и проектирования несущих и ненесущих конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных регионах с расчетной сейсмичностью площадок 7–9 баллов по шкале MSK-64.

Заключение

В статье рассмотрены и проанализированы отечественные и зарубежные нормативно-технические документы, а также труды отечественных и зарубежных исследователей в части расчетов, проектирования и экспериментальных исследований каркасно-обшивных конструкций на основе стального каркаса из холодногнутых профилей.

Результаты анализа выполненных исследований и действующих нормативно-технических документов зарубежных стран, регламентирующих требования к проектированию зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных районах, показывают, что на сегодняшний день ведутся активные исследования в данном направлении, при этом многие аспекты действительной работы таких конструкций при восприятии сейсмических нагрузок до сих пор не исследованы. В частности, как поведение ненесущих элементов и конструкций здания, так и их влияние на сейсмическую реакцию несущей системы играют ключевую роль, при этом одной из проблем нормирования требований к этим элементам и конструкциям заключается в очень большом разнообразии конструктивных решений каркасно-обшивных конструкций (разнообразие применяемых типов обшивок и их комбинаций, элементов их соединения, а также холодногнутых профилей), в т. ч. их физико-механических характеристик. Не в полной мере исследована работа каркасно-обшивных конструкций стен на основе стального каркаса из холодногнутых профилей при действии вертикальных сейсмических нагрузок, а также различные виды применяемых обшивок (аквапанели, стекломатные листы, фибролитовые плиты и т. д.).

Анализ действующих нормативно-технических документов зарубежных стран, регламентирующих требования к расчету и проектированию зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных районах, показывает различия в принятых коэффициентах редукации сейсмических нагрузок. Европейские нормы [14], так же как и отечественные [8],

фактически не содержат нормативных требований к расчету и проектированию таких зданий, возводимых в сейсмоопасных районах, хотя результаты исследований для будущей актуализации действующих нормативных документов определенно имеются.

На сегодняшний день отсутствие норм и правил проектирования зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных районах, сдерживает их широкое распространение в России. Учитывая огромную площадь территории Российской Федерации, разнообразие климатических и сейсмических районов, а также особенности и разнообразие применяемых, на территории Российской Федерации, конструктивных решений каркасно-обшивных конструкций зданий из ЛСТК, исследование действительной работы таких конструкций при действии сейсмических нагрузок является важной и насущной задачей.

Для преодоления текущего отставания отечественного свода правил в области проектирования зданий и сооружений в сейсмических районах [8], расширения знаний и повышения уровня понимания о поведении зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК при их работе в условиях сейсмических воздействий следует предусмотреть и провести комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на решение проблемы расчета и проектирования зданий из таких систем, которое не будет являться паллиативным.

Список литературы

1. Allen D. History of cold-formed steel / D. Allen // Structure Magazine. – 2006 November. – P. 28–32.
2. Specification for the design of light gage steel structural members / American Iron and Steel Institute. – Washington, DC, 1946.
3. Winter G. Strength of thin steel compression flanges / G. Winter // Transactions of the American Society of Civil Engineers. – 1947. – Vol. 112, no. 1. – P. 527–554. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006092>
4. Winter G. Thin-walled steel for modern structures: Thirty years of industry-sponsored research at Cornell / G. Winter // Engineering: Cornell Quarterly. – 1972. – Vol. 7, no. 1. – P. 2–12.
5. Seismic design method for CFS diagonal strap-braced stud walls: Experimental validation / L. Fiorino, O. Iuorio, V. Macillo [et al.] // Journal of Structural Engineering. – 2016. – Vol. 142, no. 3. – 04015154. [https://doi.org/10.1061/\[ASCE\]ST.1943-541X.0001408](https://doi.org/10.1061/[ASCE]ST.1943-541X.0001408)
6. Macillo V. Seismic response of CFS shear walls sheathed with nailed gypsum panels: Experimental tests / V. Macillo, L. Fiorino, R. Landolfo // Thin Walled Struct. – 2017. – No. 120. – P. 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.08.022>
7. СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования: введены в действие 04.06.2017. – Москва: Минстрой России, 2016. – 124 с.
8. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 мая 2018 г. N 309/пр и введен в действие с 25 ноября 2018 г. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 115 с.
9. Джинчвелашвили Г.А. Особенности применения легких стальных тонкостенных конструкций при строительстве зданий различного назначения в сейсмически активных регионах России / Г.А. Джинчвелашвили, А.В. Соснин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2010. – № 3. – С. 57–61.
10. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members [Electronic Resource]: AISI S100-16 / American Iron and Steel Institute (AISI). – Washington, DC, USA, 2016. – Mode of access: https://cfsei.memberclicks.net/assets/docs/publications/aisi-standards/aisi_s100-16_s100-16-c_e_s.pdf
11. North American Standard for Seismic Design of Cold Formed Steel Structural Systems: AISI S400-15 / American Iron and Steel Institute (AISI). – Washington, DC, USA, 2015.

12. Minimum Design Loads for Buildings and other Structures: ASCE 7-10 / American Society of Civil Engineers. – Reston, VA, USA, 2010.
13. NBCC. National Building Code of Canada / National Research Council of Canada (NRCC). – Ottawa, ON, Canada, 2005.
14. EN 1998-1 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings [Electronic Resource] / European Committee for Standardization. – Brussels, Belgium, 2004. – Mode of access: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf>
15. Shear wall resistance of lightgauge steel stud wall systems: Final technical report, prepared for national science foundation under grant No. R-8716-6263, Dec 1988 / S.A. Adham, V. Avanesian, G.C. Hart [et al.].
16. Shear wall resistance of lightgauge steel stud wall systems / S.A. Adham, V. Avanesian, G.C. Hart [et al.] // Earthquake Spectra. – 1990. – Vol. 6, no. 1. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1193/1.1585555>
17. Lateral performance of cold-formed steel-framed domestic structures / E.F. Gad, C.F. Duffield, G.L. Hutchinson [et al.] // Engineering Structures. – 1999. – Vol. 21, no. 1. – P. 83–95. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)90129-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)90129-2)
18. Seismic response and engineering of cold-formed steel framed buildings / B.W. Schafer, D. Ayhan, J. Leng // Structures. – 2016. – Vol. 8, Part 2. – P. 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.009>
19. Computationally Efficient Fastener-Based Models of Cold-Formed Steel Shear Walls with Wood Sheathing / S.G. Buonopane, G. Bian, T.H. Tun, B.W. Schafer // Journal of Constructional Steel Research. – 2015. – Vol. 110. – P. 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.03.008>
20. Ayhan D. Cold-formed steel member bending stiffness prediction / D. Ayhan, B.W. Schafer // Journal of Constructional Steel Research. – 2015. – Vol. 115. – P. 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.004>
21. Peterman K.D. Hysteretic Characterization of Cold-Formed Steel Stud-to-Sheathing Connections / K.D. Peterman, N. Nakata, B.W. Schafer // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 101. – P. 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.019>
22. Impact of construction details on OSB-sheathed cold-formed steel framed shear walls / O. Liu, K.D. Peterman, C. Yu, B.W. Schafer // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 101. – P. 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.003>
23. Peterman K.D. Behavior of Full-Scale Cold-Formed Steel Buildings Under Seismic Excitations: Ph.D. Dissertation / K.D. Peterman; Johns Hopkins University. – Baltimore, Maryland, May 2014.
24. Leng J. Simulation of Cold-Formed Steel Structures: Ph.D. Dissertation / J. Leng; Johns Hopkins University. – Baltimore, Maryland, August 2015.
25. Characterizing Joist-Ledger Performance for Cold-Formed Steel Light Frame Construction / D. Ayhan, Y. Qin, S. Torabian, B.W. Schafer // Eighth International Conference on Advances in Steel Structures, Lisbon, Portugal, July 2015. – P. 22–24.
26. Seismic Response and Engineering of Cold-Formed Steel Framed Buildings / B.W. Schafer, D. Ayhan, J. Leng [et al.] // Structures. – 2016. – Vol. 8. – P. 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.009>
27. Peterman K.D. Experimental Determination of Base Shear from Full-Scale Shake Table Testing of Two Cold-Formed Steel Framed Buildings / K.D. Peterman, B.W. Schafer // Proc. of the 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas - STESSA 2015. Shanghai, China, July 1–4, 2015.
28. OpenSees modeling of cold formed steel framed wall system / G. Bian, D.A. Padilla-Llano, J. Leng [et al.] // Proc. of the 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas - STESSA 2015. Shanghai, China, July 1–4, 2015.
29. Behavior of steel-sheathed shear walls subjected to seismic and fire loads / M.S. Hoehler, C.M. Smith, T.C. Hutchinson // Fire Safety Journal. – 2017. – Vol. 91. – P. 524–531. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.021>
30. Earthquake and fire performance of a mid-rise cold-formed steel framed building – test program and test results: rapid release (preliminary) report SSRP-2016/07 / X. Wang, T.C. Hutchinson, G. Hegemier [et al.]. – San Diego, CA, 2016.
31. Fiorino L. Shake table tests of a full-scale two-story sheathing-braced cold-formed steel building / L. Fiorino, V. Macillo, R. Landolfo // Engineering Structures. – 2017. – Vol. 151. – P. 633–647. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.056>
32. Campiche A. Numerical Modelling of CFS Three-Story Strap-Braced Building under Shaking-Table Excitations / A. Campiche // Materials. – 2021. – Vol. 14, no. 1. – P. 118. <https://doi.org/10.3390/ma14010118>
33. Characterization of cold-formed steel framed diaphragm response under in-plane loading and influence of non-structural gypsum panels / P. Latreille, V. Nikolaidou, C.A. Rogers, D.G. Lignos // CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. – St. Louis, MO, USA, 2010. – P. 1.

34. Characterization of cold-formed steel framed/woodsheathed floor and roof diaphragm structures / V. Nikolaidou, P. Latreille, C.A. Rogers, D.G. Lignos // 6th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE), Santiago, Chile, January 9–13, 2017. – Santiago, Chile: International Association of Earthquake Engineering, 2017. – P. 452.
35. Study of cold-formed steel floor systems under shear loadings / N. Baldassino, M. Bernardi, R. Zandonini, M. Zordan // Proceedings of the Eighth International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2018), Lisbon, Portugal, 24–27 July 2018.
36. Vieira L.C.M. Lateral stiffness and strength of sheathing braced cold-formed steel stud walls / L.C.M. Vieira, B.W. Schafer // Engineering Structures. 2012. – Vol. 37. – P. 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.029>
37. Peterman K.D. Hysteretic characterization of cold-formed steel stud-to-sheathing connections / K.D. Peterman, N. Nakata, B.W. Schafer // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 101. – P. 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.019>
38. Swensen S. Behavior of screw and adhesive connections to gypsum wallboard in wood and cold-formed steel-framed wallties / S. Swensen, G.G. Deierlein, E. Miranda // Journal of Structural Engineering. – 2016. – Vol. 142, no. 4. – E4015002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001307](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001307)
39. Ye J. Experimental study on shear behavior of screw connections in CFS sheathing / J. Ye, X. Wang, M. Zhao // Journal of Constructional Steel Research. – 2016. – Vol. 121. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.12.027>
40. Fiorino L. Experimental characterization of quick mechanical connecting systems for cold-formed steel structures / L. Fiorino, V. Macillo, R. Landolfo // Advances in Structural Engineering. – 2017. – Vol. 20, no. 7. – 1098–1110. <https://doi.org/10.1177/1369433216671318>
41. Experimental study on screwed connections for sheathed CFS structures with gypsum or cement based panels / L. Fiorino, T. Pali, B. Bucciero [et al.] // Thin-Walled Structures. – 2017. – Vol. 116. – P. 234–249. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.03.031>
42. Serrette R. Wood structural panel to cold-formed steel shear connections with pneumatically driven knurled steel pins / R. Serrette, D. Nolan // Practice Periodical on Structural Design and Construction. – 2017. – Vol. 22. – 04017002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000321](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000321)
43. Experimental fragility analysis of cold-formed steel-framed partition wall systems / C. Jenkins, S. Soroushian, E. Rahmanishamsi, E. Maragakis // Proceedings of the Structures Congress 2015, Portland, OR, USA, 23–25 April 2015. – P. 1760–1773.
44. Experimental fragility analysis of cold-formed steel-framed partition wall systems / C. Jenkins, S. Soroushian, E. Rahmanishamsi, E. Maragakis // Thin Walled Structures. – 2016. – Vol. 103. – P. 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.02.015>
45. Seismic performance of cold-formed steel wall systems in a full-scale building / X. Wang, E. Pantoli, T.C. Hutchinson [et al.] // Journal of Structural Engineering. – 2015. – Vol. 141, no. 10. – 04015014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001245)
46. Seismic performance evaluation of plasterboard partitions via shake table tests / G. Magliulo, C. Petrone, V. Capozzi [et al.] // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2014. – Vol. 12. – P. 1657–1677. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9567-8>
47. Fiorino L. Evaluation of seismic dynamic behaviour of drywall partitions, façades and ceilings through shake table testing / L. Fiorino, B. Bucciero, R. Landolfo // Engineering Structures. – 2019. – Vol. 180. – P. 103–123. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.028>
48. Сейсмостойкость зданий из каркасно-обшивных конструкций с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей / А.А. Бубис, И.Р. Гизятуллин, А.И. Доттуев, Т.В. Назмеева // Вестник НИЦ «Строительство». – 2021. – Т. 31, № 4. – С. 98–109. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-98-109](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-98-109)

References

1. Allen D. History of cold-formed steel. *Structure Magazine*. 2006 November:28–32.
2. American Iron and Steel Institute. Specification for the design of light gage steel structural members. Washington, DC; 1946.
3. Winter G. Strength of thin steel compression flanges. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1947;112(1):527–554. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006092>
4. Winter G. Thin-walled steel for modern structures: Thirty years of industry-sponsored research at Cornell. *Engineering: Cornell Quarterly*, 1972;7(1):2–12. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/1813/2277>
5. Fiorino L., Iuorio O., Macillo V., Terracciano M.T., Pali T., Landolfo R. Seismic design method for CFS diagonal strap-braced stud walls: Experimental validation. *Journal of Structural Engineering*. 2016;142(3):04015154. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001408](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001408)
6. Macillo V., Fiorino L., Landolfo R. Seismic response of CFS shear walls sheathed with nailed gypsum panels: Experimental tests. *Thin Walled Struct.* 2017;120:161–171. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.08.022>
7. SP 260.1325800.2016. Thin-walled steel structures made of cold-bent galvanized profiles and corrugated sheets. Moscow: Ministry of Construction of Russia; 2016 [in Russian].
8. SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas. Updated version of SNiP II-7-81*. Moscow: Standartinform; 2018 [in Russian].
9. Jinchvelashvili G.A., Sosnin A.V. Features of the use of light steel thin-walled structures in the construction of buildings for various purposes in seismically active regions of Russia. *Seismostoitkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* = Earthquake engineering. Constructions safety. 2010;(3):57–61 [in Russian].
10. AISI S100-16. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. – Washington, DC, USA; 2016. Available at: https://cfsei.memberclicks.net/assets/docs/publications/aisi-standards/aisi100-16s100-16-c_e_s.pdf
11. AISI. S400-15 North American Standard for Seismic Design of Cold Formed Steel Structural Systems. Washington, DC, USA; 2015.
12. ASCE 7-10. Minimum Design Loads for Buildings and other Structures. Reston, VA, USA; 2010.
13. NBCC. National Building Code of Canada. Ottawa, ON, Canada: National Research Council of Canada (NRCC); 2005.
14. EN 1998-1 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. Brussels, Belgium; 2004. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf>
15. Adham S.A., Avanessian V., Hart G.C., Anderson R.W., Elmlinger J., Gregory J. Shear wall resistance of lightgage steel stud wall systems. Final technical report, prepared for national science foundation under grant No. R-8716-6263, Dec 1988.
16. Adham S.A., Avanessian V., Hart G.C., Anderson R.W., Elmlinger J., Gregory J. Shear wall resistance of lightgage steel stud wall systems. *Earthquake Spectra*. 1990;6(1):1–14. <https://doi.org/10.1193/1.1585555>
17. Gad E.F., Duffield C.F., Hutchinson G.L., Mansell D.S., Stark G. Lateral performance of cold-formed steel-framed domestic structures. *Engineering Structures*. 1999;21(1):83–95. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)90129-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)90129-2)
18. Schafer B.W., Ayhan D., Leng J., Liu P., Padilla-Llano D., Peterman K.D., et al. Seismic response and engineering of cold-formed steel framed buildings. *Structures*. 2016;8(2):197–212. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.009>
19. Buonopane S.G., Bian G., Tun T.H., Schafer B.W. Computationally Efficient Fastener-Based Models of Cold-Formed Steel Shear Walls with Wood Sheathing. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015;110:137–148. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.03.008>
20. Ayhan D., Schafer B.W. Cold-formed steel member bending stiffness prediction. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015;115:148–159. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.004>
21. Peterman K.D., Nakata N., Schafer B.W. Hysteretic Characterization of Cold-Formed Steel Stud-to-Sheathing Connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;101:254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.019>
22. Liu O., Peterman K.D., Yu C., Schafer B.W. Impact of construction details on OSB-sheathed cold-formed steel framed shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;101:114–123. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.003>
23. Peterman K.D. Behavior of Full-Scale Cold-Formed Steel Buildings Under Seismic Excitations. Ph.D. Dissertation. Baltimore, Maryland; Johns Hopkins University; 2014.

24. *Leng J.* Simulation of Cold-Formed Steel Structures. Ph.D. Dissertation. Baltimore, Maryland; Johns Hopkins University; 2015.
25. *Ayhan D., Qin Y., Torabian S., Schafer B.W.* Characterizing Joist-Ledger Performance for Cold-Formed Steel Light Frame Construction. In: Eighth International Conference on Advances in Steel Structures; Lisbon, Portugal; July 2015. p. 22–24.
26. *Schafer B.W., D. Ayhan, Leng J., Liu P., Padilla-Llano D., Peterman K.D., et al.* Seismic Response and Engineering of Cold-Formed Steel Framed Buildings. Structures. 2016;8:197–212. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.009>
27. *Peterman K.D., Schafer B.W.* Experimental Determination of Base Shear from Full-Scale Shake Table Testing of Two Cold-Formed Steel Framed Buildings. In: Proc. of the 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas - STESSA 2015; Shanghai, China; July 1–4, 2015.
28. *Bian G., Padilla-Llano D.A., Leng J., Buonopane S.G., Moen C.D., Schafer B.W.* OpenSees modeling of cold formed steel framed wall system. In: Proc. of the 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas - STESSA 2015; Shanghai, China; July 1–4, 2015.
29. *Hoehler M.S., Smith C.M., Hutchinson T.C., Wang X., Meacham B.J., Kamath P.* Behavior of steel-sheathed shear walls subjected to seismic and fire loads. Fire Safety Journal. 2017;91:524–531. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.021>
30. *Wang X., Hutchinson T.C., Hegemier G., Gunisetty S., Kamath P., Meacham B.* Earthquake and fire performance of a mid-rise cold-formed steel framed building – test program and test results: rapid release (preliminary) report SSRP-2016/07. San Diego, CA; 2016.
31. *Fiorino L., Macillo V., Landolfo R.* Shake table tests of a full-scale two-story sheathing-braced cold-formed steel building. Engineering Structures. 2017;151:633–647. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.056>
32. *Campiche A.* Numerical Modelling of CFS Three-Story Strap-Braced Building under Shaking-Table Excitations. Materials. 2021;14(1):118. <https://doi.org/10.3390/ma14010118>.
33. *Latreille P., Nikolaidou V., Rogers C.A., Lignos D.G.* Characterization of cold-formed steel framed diaphragm response under in-plane loading and influence of non-structural gypsum panels. In: CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. St. Louis, MO, USA; 2010. p. 1.
34. *Nikolaidou V., Latreille P., Rogers C.A., Lignos D.G.* Characterization of cold-formed steel framed/ woodsheathed floor and roof diaphragm structures. In: 6th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE), Santiago, Chile, January 9–13, 2017. Santiago, Chile: International Association of Earthquake Engineering; 2017. p. 452.
35. *Baldassino N., Bernardi M., Zandonini R., Zordan M.* Study of cold-formed steel floor systems under shear loadings. In: Proceedings of the Eighth International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2018); Lisbon, Portugal; 24–27 July 2018.
36. *Vieira L.C.M., Schafer B.W.* Lateral stiffness and strength of sheathing braced cold-formed steel stud walls. Engineering Structures. 2012;37:205–213. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.029>
37. *Peterman K.D., Nakata N., Schafer B.W.* Hysteretic characterization of cold-formed steel stud-to-sheathing connections. Journal of Constructional Steel Research. 2014;101:254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.019>
38. *Swensen S., Deierlein G.G., Miranda E.* Behavior of screw and adhesive connections to gypsum wallboard in wood and cold-formed steel-framed wall-joints. Journal of Structural Engineering. 2016;142(4):E4015002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001307](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001307)
39. *Ye J., Wang X., Zhao M.* Experimental study on shear behavior of screw connections in CFS sheathing. Journal of Constructional Steel Research. 2016;121:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.12.027>
40. *Fiorino L., Macillo V., Landolfo R.* Experimental characterization of quick mechanical connecting systems for cold-formed steel structures. Advances in Structural Engineering. 2017;20(7):1098–1110. <https://doi.org/10.1177/1369433216671318>
41. *Fiorino L., Pali T., Bucciero B., Macillo V., Teresa Terracciano M., Landolfo R.* Experimental study on screwed connections for sheathed CFS structures with gypsum or cement based panels. Thin-Walled Structures. 2017;116:234–249. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.03.031>
42. *Serrette R., Nolan D.* Wood structural panel to cold-formed steel shear connections with pneumatically driven knurled steel pins. Practice Periodical on Structural Design and Construction. 2017;22:04017002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000321](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000321)

- 43.** Jenkins C., Soroushian S., Rahmanishamsi E., Maragakis E. Experimental fragility analysis of cold-formed steel-framed partition wall systems. In: Proceedings of the Structures Congress 2015; Portland, OR, USA; 23–25 April 2015. p. 1760–1773.
- 44.** Jenkins C., Soroushian S., Rahmanishamsi E., Maragakis E.M. Experimental fragility analysis of cold-formed steel-framed partition wall systems. Thin-Walled Structures. 2016;103:115–127. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.02.015>
- 45.** Wang X., Pantoli E., Hutchinson T.C., Restrepo J.I., Wood R.L., Hoehler M.S., et al. Seismic performance of cold-formed steel wall systems in a full-scale building. Journal of Structural Engineering. 2015;141(10):04015014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001245)
- 46.** Magliulo G., Petrone C., Capozzi V., Maddaloni G., Lopez P., Manfredi G. Seismic performance evaluation of plasterboard partitions via shake table tests. Bulletin of Earthquake Engineering. 2014;12:1657–1677. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9567-8>
- 47.** Fiorino L., Buciero B., Landolfo R. Evaluation of seismic dynamic behaviour of drywall partitions, façades and ceilings through shake table testing. Engineering Structures. 2019;180:103–123. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.028>
- 48.** Bubis A.A., Gizyatullin I.R., Dottuev A.I., Nazmeeva T.V. Earthquake resistance of buildings made of frame-sheathing structures with a frame made of cold-bent galvanized steel profiles. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021;31(4):98–109 (in Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-98-109](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-98-109)

Информация об авторе / Information about the author

Ильнур Разевич Гизятуллин, заведующий сектором расчета сооружений (ЛССИМС), ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: gizatullin1994@yandex.ru

Ilnur R. Giziatullin, Head of Department, Department of Structural Engineering (LSSIMS), Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: gizatullin1994@yandex.ru