

УДК 699.841

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ЗДАНИЙ ИЗ КАРКАСНО-ОБШИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КАРКАСОМ ИЗ СТАЛЬНЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ОЦИНКОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Гизятуллин И.Р.

Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, г. Москва, 109428, Российская Федерация, gizatullin1994@yandex.ru

***Аннотация:** 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.*

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.

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. Приведены результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по исследованию каркасно-обшивных стеновых конструкций с каркасом из стальных холодногнутох оцинкованных профилей при действии на них нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия, выполненных в ЦНИИСК им.В.А.Кучеренко в 2021 году.

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.

SEISMIC RESISTANCE OF FRAME-CLADDING BUILDINGS HAVING COLD-FORMED GALVANIZED STEEL CONSTRUCTION

Giziatullin I.R.

Research Institute of Building Construction (TSNIISK) named after V.A. Kucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation, gizatullin1994@yandex.ru

Abstract: *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.*

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.

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. The results of research and development work on the study of frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel constructions under loads simulating seismic effects, carried out at the TsNIISK named after V.A. Kucherenko in 2021, are presented.

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.

СУУК ПРОФИЛЬДЕНГЕН ГАЛВАНИЗДИЛГЕН БОЛОТ ПРОФИЛДЕРДЕН КАНА МЕНЕН КАНА-КАБАЛЫК КОНСТРУКЦИЯЛАРДАН ИМАРАТТАРДЫН СЕЙСМИКАЛЫК ТУРУКТУУЛУГУ

Гизятуллин И.Р.

*ЦНИИСК им.В.А. Кучеренко, АО "НИЦ "Строительство", 2-Институтская көч., 6, Москва, 109428, Россия
Федерациясы, gizatullin1994@yandex.ru*

Аннотация: *Сейсмикалык таасирлерди имитациялоочу жүктөрдүн таасири астында муздак формадагы цинктелген болот профилдеринен жасалган каркастары бар ар кандай типтеги каркас каптоочу дубал конструкцияларынын жүрүм-турумунун өзгөчөлүктөрү, артыкчылыктары жана кемчиликтери каралат. Изилдөөнүн актуалдуулугу көрсөтүлүп, Россия Федерациясынын жер титирөө коркунучу бар аймактарында курулган жеңил болоттон жасалган ичке дубалдуу конструкциялардан (ЛСТК) имараттарды кеңири колдонууну чектеген көйгөйлөр аныкталган.*

Жер титирөө коркунучу бар аймактарда курулган ЛСТК каркас-каптоочу конструкциялардын негизинде имараттарды эсептөө жана долбоорлоо боюнча ар кандай өлкөлөрдүн ченемдик талаптары, мурда жүргүзүлгөн эксперименталдык изилдөөлөрдүн натыйжалары менен ата мекендик жана чет элдик басылмалар талданган.

Колдонуудагы ата мекендик жана чет өлкөлүк ченемдик-техникалык документтердин кыскача баяндамасы жана талдоосу жана сейсмикалык кооптуу аймактарда тургузулган жеңил болот кездемеден жасалган каркас-каптоочу конструкциялардын негизинде

имараттарды эсептөө жана долбоорлоо жаатындагы изилдөөлөрдүн натыйжалары берилген. Имараттардын сейсмикалык аракеттерди имитациялоочу жүктөрдүн таасири астында ЛСТКдан имараттардын жүк көтөрүүчү жана көтөрүүчү эмес каркас-капка конструкцияларын, ошондой эле бириктирүүчү элементтерин эксперименталдык изилдөө жаатындагы акыркы жетишкендиктердин натыйжалары каралат жана жалпыланат. Учурдагы прогрессти, проблемаларды жана изилдөөнүн келечектеги багыттарын көрсөтүү максатында. Америка Кошмо Штаттарынын жана Канаданын колдонуудагы ченемдик-техникалык документтеринде сейсмикалык жүктү азайтуу факторлорун дайындоо жагынан айырмачылыктар, ошондой эле имараттарды эсептөө жана долбоорлоо талаптарын жөнгө салуу жагынан европалык жана ата мекендик ченемдик документтин артта калуусу белгиленген. сейсмикалык аймактарда тургузулган ЛСТКдан жасалган каркас-капталган конструкциялардын негизинде. 2021-жылы В.А.Кучеренко атындагы ЦНИИСКда сейсмикалык эффекттерди симуляциялоочу жүктөрдүн таасири астында болоттон жасалган муздак формадагы цинктелген профилдер менен каркас каптоочу дубал конструкцияларын изилдөө боюнча илимий-изилдөө жана тажрыйба-конструктордук иштердин натыйжалары берилген.

Берилген маалыматтар теориялык жана эксперименталдык изилдөөлөрдүн, ченемдик-техникалык документтерди иштеп чыгуунун жана өркүндөтүүнүн зарылдыгын ырастайт, бул ЛСТКдан жасалган каркастык каптоочу конструкциялардын негизинде имараттардын ишенимдүүлүгүн жана механикалык коопсуздугун жогорулатууга жана сейсмикалык кооптуу аймактарда алардын таралышын кыйла кеңейтүүгө мүмкүндүк берет. Россиянын.

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).

Свыше 25 % территории Российской Федерации относится к сейсмоактивным районам, при этом значительную площадь занимают чрезвычайно опасные в сейсмическом отношении 8–9 и свыше балльные зоны по шкале MSK-64. Некоторая часть из этих территорий особо привлекательна для освоения, поскольку обладает богатыми запасами природных ресурсов, другая часть территорий представляет собой зоны активного отдыха населения. Несмотря на труднодоступность, сейсмическую опасность, сложные грунтовые и климатические условия, строительство зданий и сооружений в сейсмоактивных районах активно развивается. Развитие данных территорий ставит перед строительной отраслью новые задачи по обеспечению сейсмостойкости зданий и сооружений.

Учитывая вышеуказанные факторы, применение традиционных строительных технологий для определенного класса зданий (малоэтажные и здания средней

этажности) является менее рентабельным и привлекательным. В то время как технология строительства из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) обладает рядом преимуществ при строительстве зданий в сейсмоопасных районах, таких как: индустриальность изготовления, отсутствие мокрых процессов на строительной площадке, легкость, долговечность и экономичность. Однако знания о сейсмическом поведении конструктивных систем зданий на основе ЛСТК по-прежнему ограничены что, несомненно, является препятствием к их массовому применению.

Конструктивные системы зданий с применением каркасов из ЛСТК на основе стальных холодногнутых 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 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 в сейсмоопасных районах, где легкость играет одну из ключевых ролей в обеспечении их сейсмостойкости.

Использование холодногнутых 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 холодногнутых стальных тонкостенных элементов. Идея использования холодногнутой листовой стали для возведения стальных каркасов зданий массового рынка малоэтажного строительства существовала в течение долгого времени. Началом применения холодногнутых 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.

Сопrotивление сейсмическому воздействию конструкций из ЛСТК обеспечивается с помощью различных систем: крестообразной связи из стальных лент (рис. 1а), панелей наружной и внутренней обшивок (рис. 1б), смешанные решения, совмещающие применение связей и панелей обшивок.

а



б

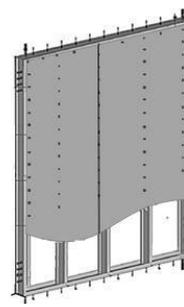


Рис. 1. Элементы, сопротивляющиеся сейсмическому воздействию [15]:

а – конструкция стены из ЛСТК с крестообразной связью; б – конструкция стены из ЛСТК с панелями обшивки

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. 2).

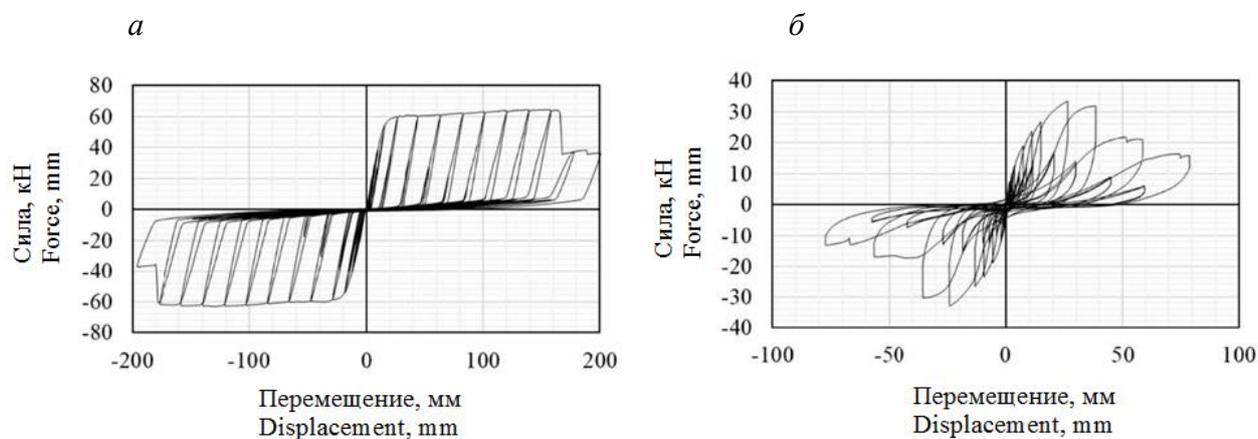


Рис. 2. Гистерезисный отклик типовых конструктивных систем, выполненных по технологии ЛСТК на основе стального каркаса из холодногнутых профилей: а – поведение каркаса конструктивной системы с крестообразными связями [5]; б – поведение каркаса конструктивной системы с обшивкой из гипсокартонных листов (ГКЛ) [6]

На рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** 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 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.

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 холодногнутого 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 холодногнутого 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. 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.

Таблица 1

Коэффициенты R регламентируемые для зданий с применением каркасов из ЛСТК в соответствии с ASCE 7 [12] и 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	-	2.55

	деревянных конструкционных панелей с другой		
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 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАНЕЕ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования по изучению поведения каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК под действием сейсмических нагрузок начались в конце 80-х гг. в начале 90-х гг. В работах под руководством С.А. Адхама (S.A. Adham) [16, 17], были проведены экспериментальные исследования по оценке прочности и деформативности каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК с крестообразными связями и обшивками из гипсокартонных листов, при сдвиговых (в плоскости каркаса) циклических нагрузках. Всего было испытано шесть образцов размером $2,4 \times 2,4$ метра. Сдвиговая жесткость каркаса для стабилизированного гистерезиса снизилась примерно на 7-15% по сравнению со сдвиговой жесткостью соответствующего исходного цикла. Деградация сдвиговой жесткости увеличивалась по мере увеличения величины перекоса каркаса. Способность каркаса рассеивать энергию в стабилизированном цикле составляла около 60% от исходного цикла.

Все большую популярность набирают экспериментальные исследования с применением сейсмоплатформ, моделирующих сейсмические воздействия. В

предыдущие годы испытания каркасов из ЛСТК на сейсмоплатформах широко использовались в США и Европе, хотя первый эксперимент был проведен в Австралии [18]. Более крупные исследования проводились в США, в рамках проекта «CFS-NEES», и включали испытания на сейсмоплатформе двухэтажного натурального фрагмента общественного здания (Рис.3а), конструкции стен и полов которого были обшиты деревянными конструкционными панелями [19]. В Калифорнийском университете были проведены исследования на сейсмоплатформе сейсмического поведения шестиэтажного здания (Рис.3б) каркасы стен которого были обшиты с одной стороны стальными листами, а с другой стороны гипсокартонными панелями [20]. Результаты испытаний показали, что включение ненесущих конструкций к испытываемому образцу дополнительно увеличило в 4,5 раза сдвиговую жесткость здания [20].

а



б

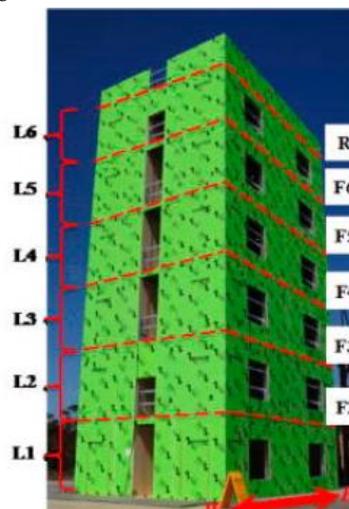


Рис. 3. Экспериментальные образцы моделей и фрагментов зданий, испытанных на сейсмоплатформах: а) здание из каркасных конструкций несущих стен с панелями обшивок из деревянных конструкционных панелей [19]; б) здание из каркасных конструкций несущих стен с комбинированными панелями обшивок из стальных и гипсокартонных листов [20]

В Италии, в рамках европейского проекта «ELISSA», были проведены исследования, включающие испытания на сейсмоплатформе полномасштабного двухэтажного здания (Рис.4а) с облицовкой конструкций стен гипсовыми панелями [21]. По результатам данных исследований было установлено, что динамические характеристики здания были значительно изменены с включением в работу ненесущих 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 раза.

В рамках проекта «LAMIEREDIL» [22] была оценена сейсмическая реакция двух трехэтажных моделей, выполненных из конструкций каркасов по технологии ЛСТК с

ленточными крестообразными связями (Рис.4б). Исследование проводилось на сейсмоплатформе, результаты испытаний показали, что глобальная реакция системы была почти линейной для обоих образцов в рамках использованных уровней воздействия. Наблюдаемыми повреждениями были растяжение ленточных крестообразных связей и ослаблением соединений.

а



б



Рис. 4. Экспериментальные образцы моделей и фрагментов зданий, испытанных на сейсмоплатформах: а) здание из каркасных конструкций несущих стен с панелями обшивки из гипсокартонных листов [21]; б) модель здания из каркасных конструкций несущих стен с крестообразными связями [22]

Меньшее количество работ посвящено исследованию горизонтальных диафрагм из каркасных конструкций перекрытий по технологии ЛСТК, о чем свидетельствуют немногочисленные исследования, проведенные в Канаде на диафрагмах, обшитых деревянными конструкционными панелями (Рис.5а), с различными конструктивными решениями и слоями отделочного материала [23, 24], а также деревянных диафрагм, обшитых деревянными конструкционными панелями, и диафрагм со стальным настилом (Рис.5б) в Италии [25].

а



б



Рис. 5. а) Образец горизонтальной диафрагмы (перекрытия) с обшивкой из деревянных конструкционных панелей [24]; б) образец горизонтальной диафрагмы (перекрытия) со стальным настилом [25]

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 и сталью имеет решающее значение для каркасно-обшивных конструкций, где эти соединения оказывают большое влияние на глобальную сейсмическую реакцию. Последние работы были особенно сосредоточены на исследованиях соединения между профилями каркаса и панелями обшивки. В США исследовались соединения обшивок из деревянных и гипсокартонных панелей [26, 27, 28], в Китае проводились исследования соединений обшивок из деревянных, гипсокартонных, стекломагнезовых и кальциево-силикатных панелях [29], в Италии исследовались соединения обшивок из гипсокартонных панелей [30, 31]. По результатам исследований установлено, что тип обшивки оказывает значительное влияние на сдвиговую реакцию соединения. Для соединений с деревянной обшивкой, которые демонстрируют большую прочность и способность рассеивать энергию, преобладающим видом разрушения является сквозное вытягивание саморезов из соединения (Рис.6а), тогда как для соединения с гипсокартонной обшивкой, которые демонстрируют большую податливость, преобладающим видом разрушения является разрушение опорной площади вокруг самореза (Рис.6б).

а



б

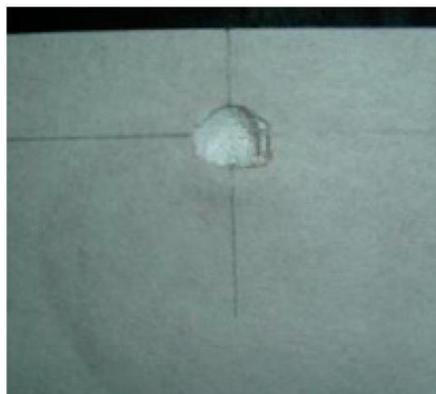


Рис. 6. а) Разрушение соединения деревянной обшивки [32]; б) разрушения соединения гипсокартонной обшивки

Активные работы ведутся и в области исследования поведения ненесущих каркасных конструкций здания из ЛСТК. Проведены испытания двухэтажного стального каркасного здания с перегородками и потолочными системами из ЛСТК (Рис.7а) [33], пятиэтажного железобетонного здания с конструкциями фасадов и перегородок из ЛСТК (Рис.7б) [34], одноэтажных конструкций с перегородками

(Рис.8а) [35, 36], фасадами (Рис.8б) [36], подвесными потолочными системами [37] из ЛСТК.

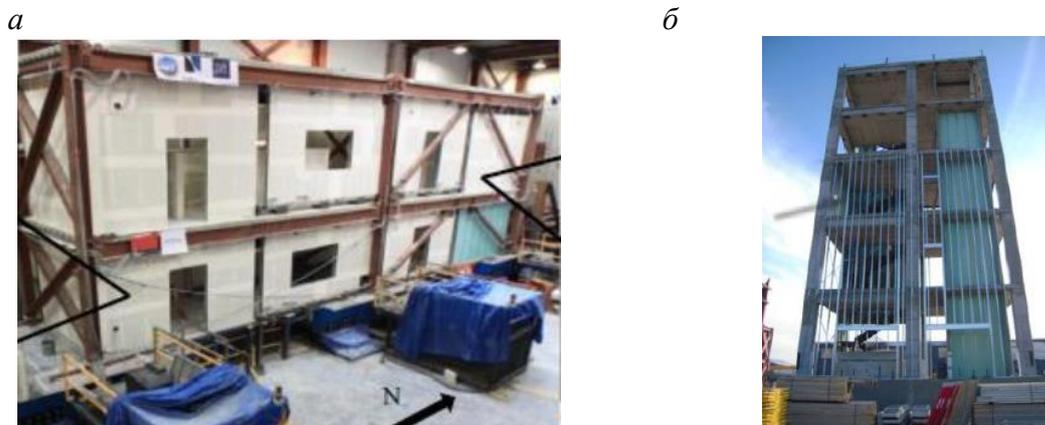


Рис. 7. Экспериментальные образцы моделей и фрагментов зданий с несущими конструкциями из ЛСТК, испытанных на сейсмоплатформах: а) двухэтажное здание со стальным каркасом, включающее перегородки и потолочные системы из ЛСТК [38]; б) пятиэтажное железобетонное здание, включающее перегородки и фасадные системы [36]

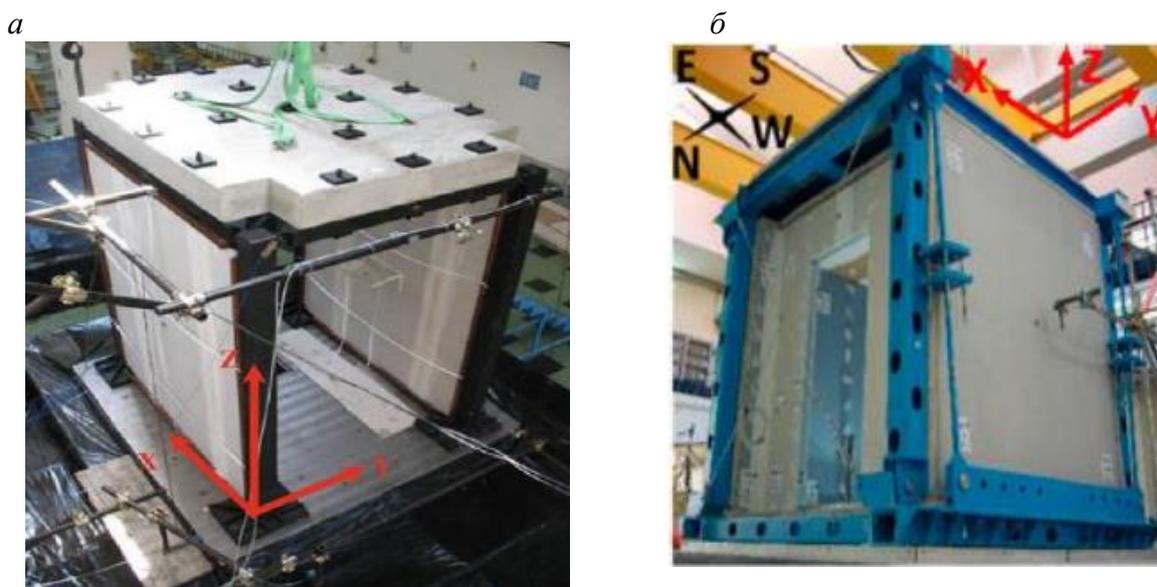


Рис. 8. Экспериментальные образцы моделей и фрагментов зданий с несущими конструкциями из ЛСТК, испытанных на сейсмоплатформах: а) одноэтажный фрагмент здания, включающий перегородки [37]; б) одноэтажный фрагмент здания, включающий перегородки, фасадные системы и подвесные потолки [38]

Основными целями данных исследований была оценка динамического поведения несущих конструкций, выполненных из ЛСТК, а также оценка влияния различных конструктивных параметров на их сейсмостойкость.

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 каркасно-обшивных конструкций панелей при действии статических и динамических нагрузок,

моделирующих сейсмические воздействия интенсивностью 7–9 баллов по шкале MSK-64 [39, 40].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ЦНИИСК ИМ. В.А. КУЧЕРЕНКО

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 обшивок к каркасу 150 и 300 мм, а также каркасно-обшивных конструкций стеновых панелей с вертикальной Х-образной связью из стальных оцинкованных лент (Рис. 9). Испытания предусматривали образцы конструкций каркаса из стальных холодногнутых оцинкованных профилей наружной несущей стеновой панели с габаритными размерами (без учета толщины обшивок) 3000 × 2400 × 200 мм (В × Ш × 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. 10). Результаты настоящих экспериментальных исследований готовятся к публикации.

Основной задачей проведения статических испытаний является определение значений сдвигового сопротивления стального каркаса стеновой панели из ЛСТК, допустимого относительного смещения верха стеновой панели каркаса из ЛСТК относительно низа (междуэтажного перекоса), оценка характера разрушения элементов каркаса, качественная и количественная оценка сдвигового сопротивления различных типов конструктивных решений каркасно-обшивочных конструкций стен из ЛСТК.

Для определения прочностных и деформационных сдвиговых характеристик конструкций стеновых панелей проводились испытания на перекос переменной статической нагрузкой.

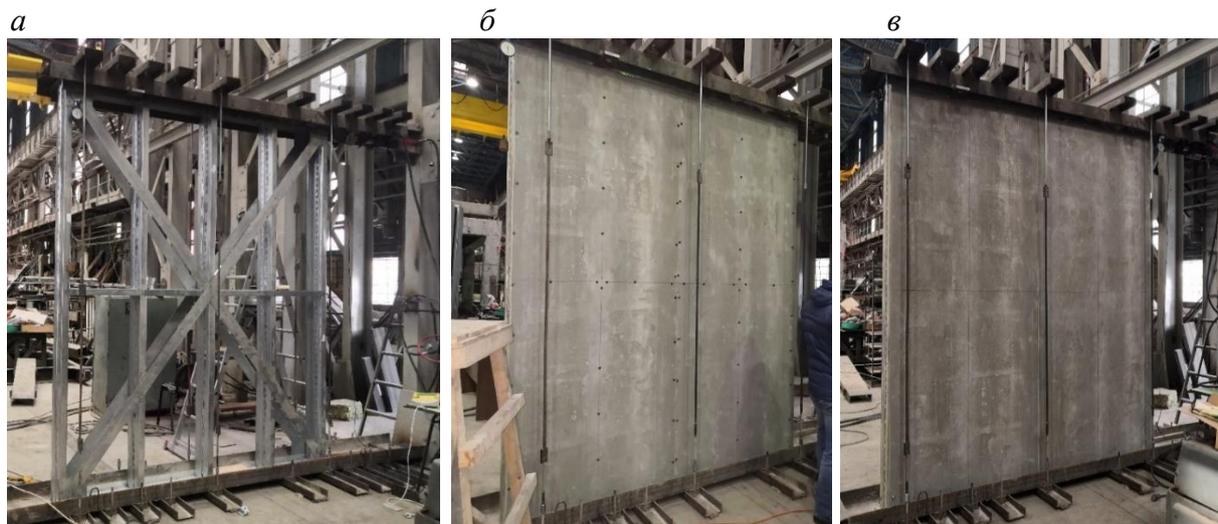


Рис. 9. Общий вид экспериментальных образцов стеновых панелей из ЛСТК: а – с вертикальной X-образной связью; б – с однослойной наружной панелью обшивки из ЦСП толщиной 10 мм; в – с двухслойной наружной панелью обшивки из ЦСП толщиной 20 мм

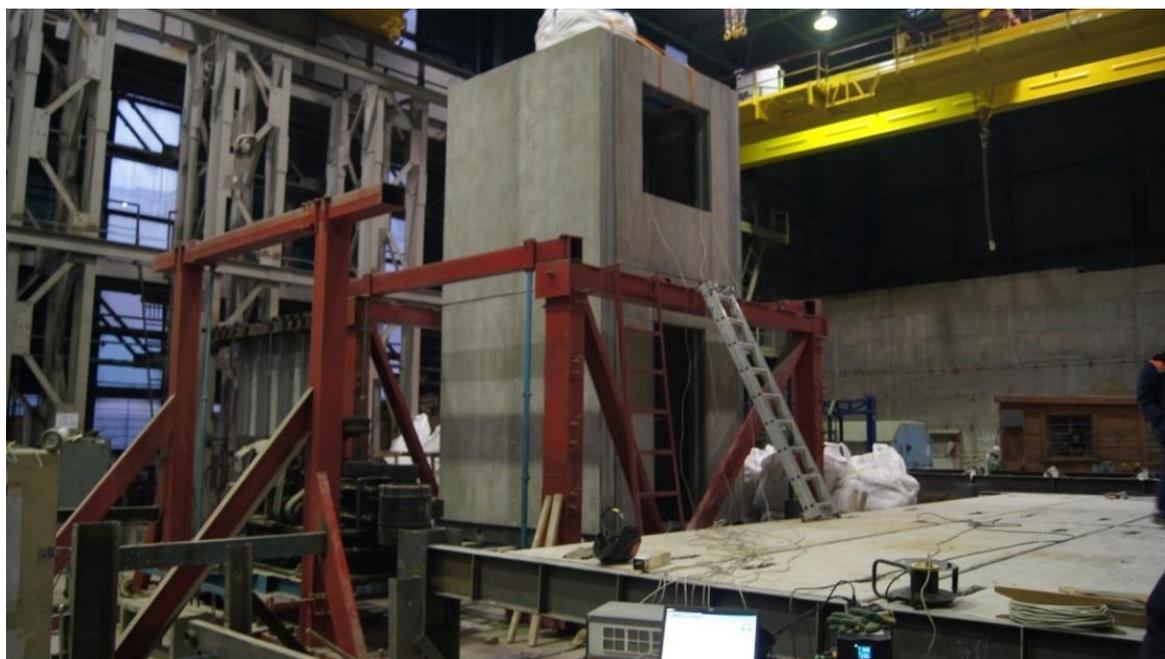


Рис. 10. Общий вид экспериментального образца двухэтажного фрагмента здания из ЛСТК

Нагружение образцов проводилось переменной статической нагрузкой с нарастанием амплитуды перекоса панели (Δ) в соответствии с протоколом нагружения на рисунке 11 до нагрузки, воспринимаемой элементами сопротивления деформациям перекоса панели (X-образные связи, панели обшивок). За отказ (разрушение) элементов сопротивления деформациям перекоса принят цикл нагружения, при котором была достигнута максимальная нагрузка и при последующих циклах наблюдался рост деформаций без увеличения нагрузки.

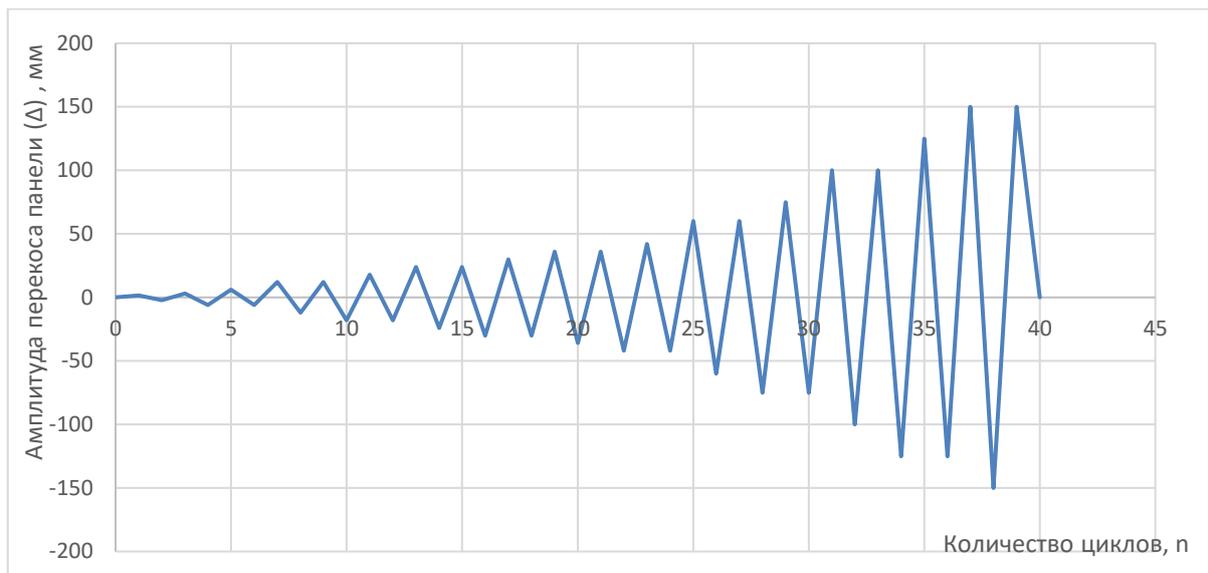


Рис.11. *Протокол нагружения образца*

Соответствующие перемещения (Δ) нагрузочной балки стенда в уровне верха каркасов стеновых панелей из ЛСТК контролировались прогибомером М1. Деформации каркасов стеновых панелей (изменение диагональных размеров) контролировались прогибомерами М2 и М3.

Результаты испытаний образцов конструкций наружной несущей стеновой панели на основе сборного каркаса из легких стальных холодногнутых оцинкованных профилей с Х-образной связью из стальных оцинкованных лент представлен на рисунке 12.

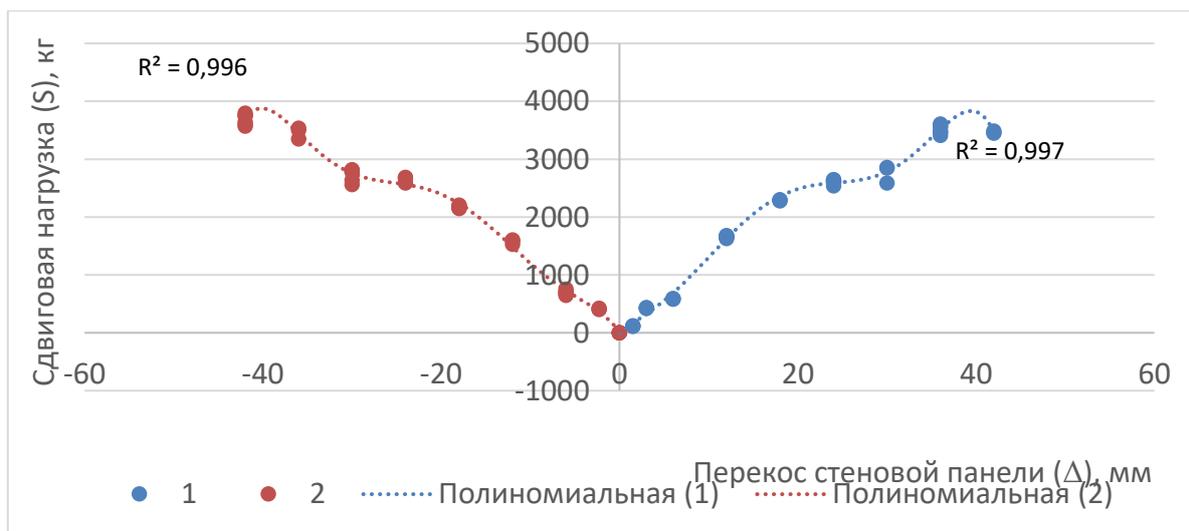


Рис.12. *График аппроксимирующей функции сдвиговая нагрузка–перекос стеновой панели по данным трех испытаний образцов при переменном движении штока домкрата (приложения нагрузки) по направлению образца (синий) и против направления (красный)*

Характерные повреждения, полученные в ходе испытаний X-образных панелей, представлены на рисунках 13-16.



Рис.13. Потеря устойчивости сжатой ветви вертикальной связи

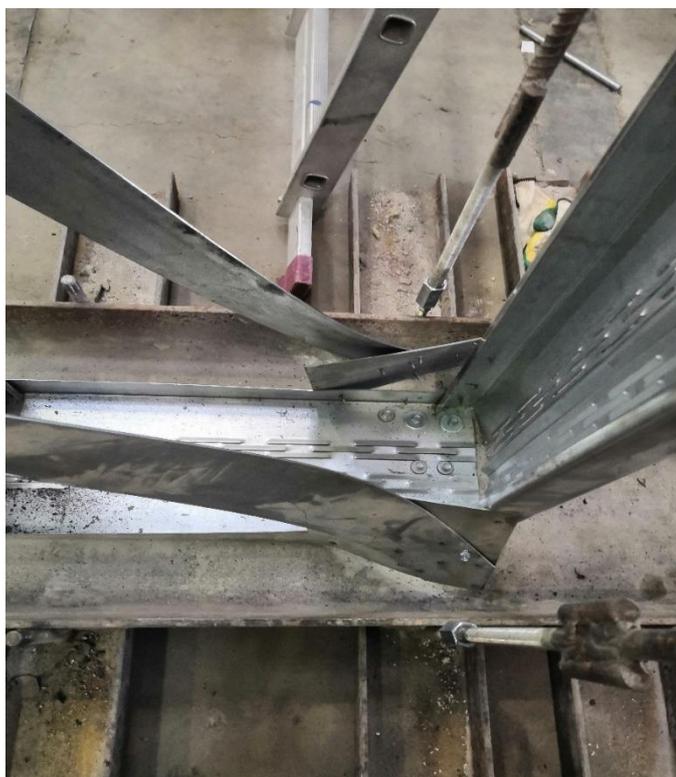


Рис.14. Отказ 2/3 самонарезающих винтов нисходящей ветви связей



Рис.15. Деформирование распорки в зоне соединения

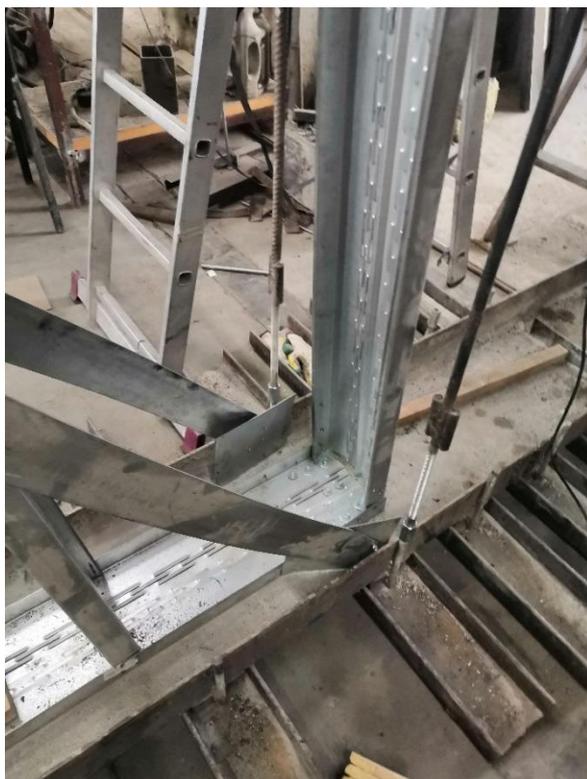


Рис.16. Полный отказ связей (разрушение узлов соединения)

Результаты испытаний образцов конструкций наружной несущей стеновой панели на основе сборного каркаса из легких стальных холодногнутых оцинкованных профилей с двухслойной обшивкой плитами ЦСП по ГОСТ 26816-2016 толщиной по 10 мм каждый ($2 \times 10 = 20$ мм) представлены на рисунке 17.

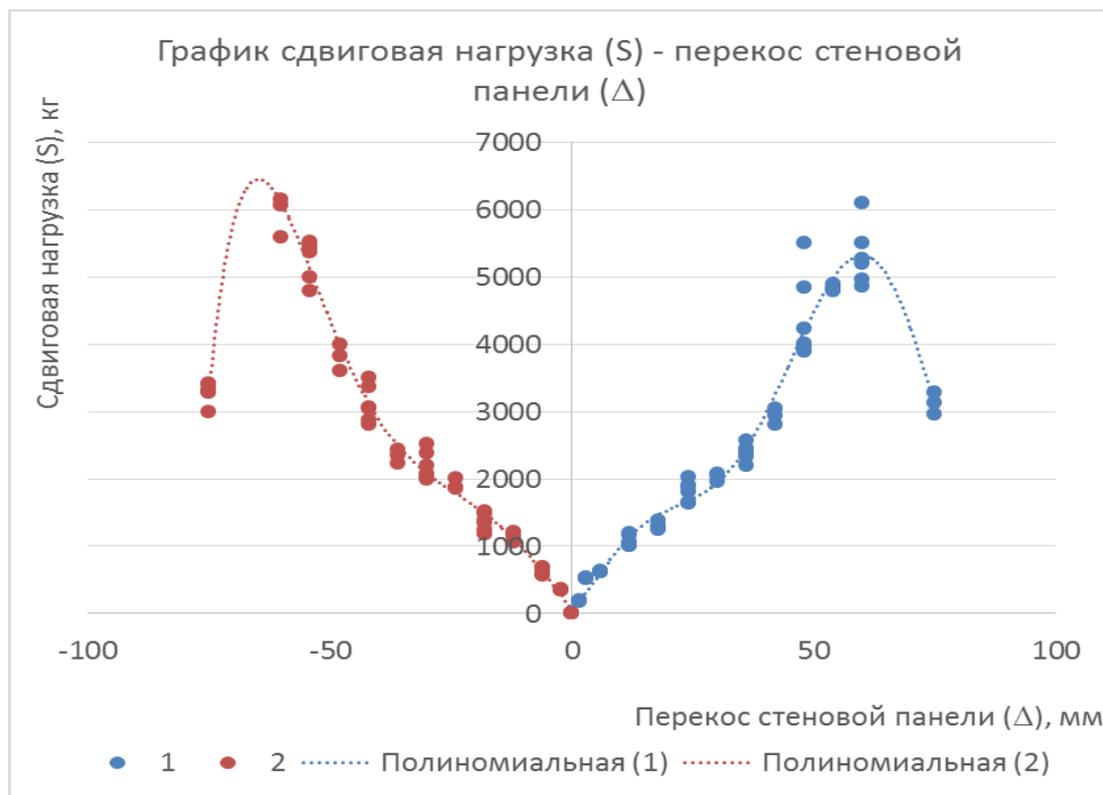


Рис.17. График аппроксимирующей функции сдвиговая нагрузка–перекося стеновой панели по данным трех испытаний образцов при переменном движении штока домкрата (приложения нагрузки) по направлению образца (синий) и против направления (красный)

Характерные повреждения, полученные в ходе испытаний панелей с двухслойной обшивкой плитами ЦСП по ГОСТ 26816-2016 толщиной по 10 мм каждый ($2 \times 10 = 20$ мм), представлены на рисунках 18-19.



Рис.18. Изменение горизонтальной соосности панелей ЦСП. Скол плиты в зоне крепления



Рис.19. Скол угловой зоны плиты ЦСП в средней части стеновой панели (зона стыка панелей)

Результаты испытаний образцов конструкций наружной несущей стеновой панели на основе сборного каркаса из легких стальных холодногнутых оцинкованных профилей с однослойной обшивкой плитами ЦСП по ГОСТ 26816-2016 толщиной 10 мм с внешней (необогреваемой) стороны с шагом закрепления 300 мм представлены на рисунке 20.

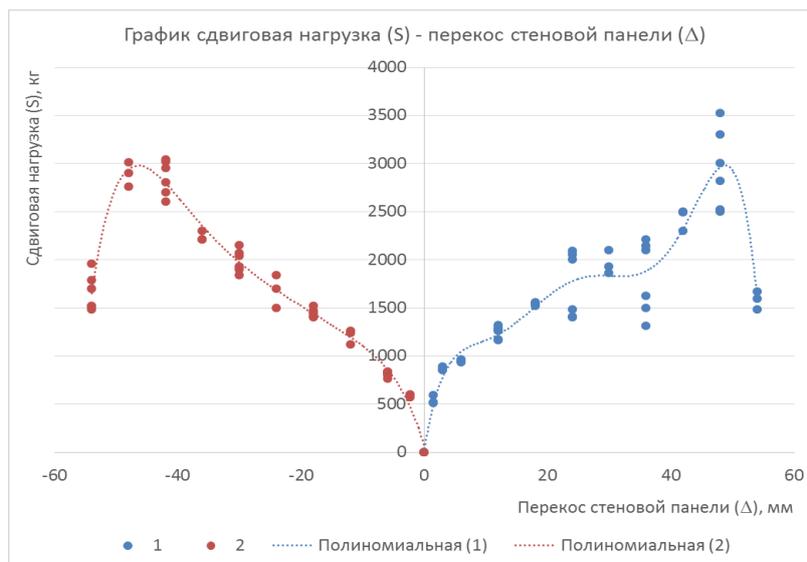


Рис.20. График аппроксимирующей функции сдвиговая нагрузка–перекус стеновой панели по данным трех испытаний образцов при переменном движении штока домкрата (приложения нагрузки) по направлению образца (синий) и против направления (красный)

Характерные повреждения, полученные в ходе испытаний панелей с однослойной обшивкой плитами ЦСП по ГОСТ 26816-2016 толщиной 10 мм с внешней (необогреваемой) стороны с шагом закрепления 300 мм, представлены на рисунках 21-22.



Рис.21. Разрушение зон крепления обшивки по краю (в зоне стыка двух плит) плиты ЦСП



Рис.22. Разрушение плиты ЦСП и крепления вдоль стыка плит

Результаты испытаний образцов конструкций наружной несущей стеновой панели на основе сборного каркаса из легких стальных холодногнутых оцинкованных профилей с однослойной обшивкой плитами ЦСП по ГОСТ 26816-2016 толщиной 10 мм с внешней (необогреваемой) стороны с шагом закрепления 150 мм представлены на рисунке 23.

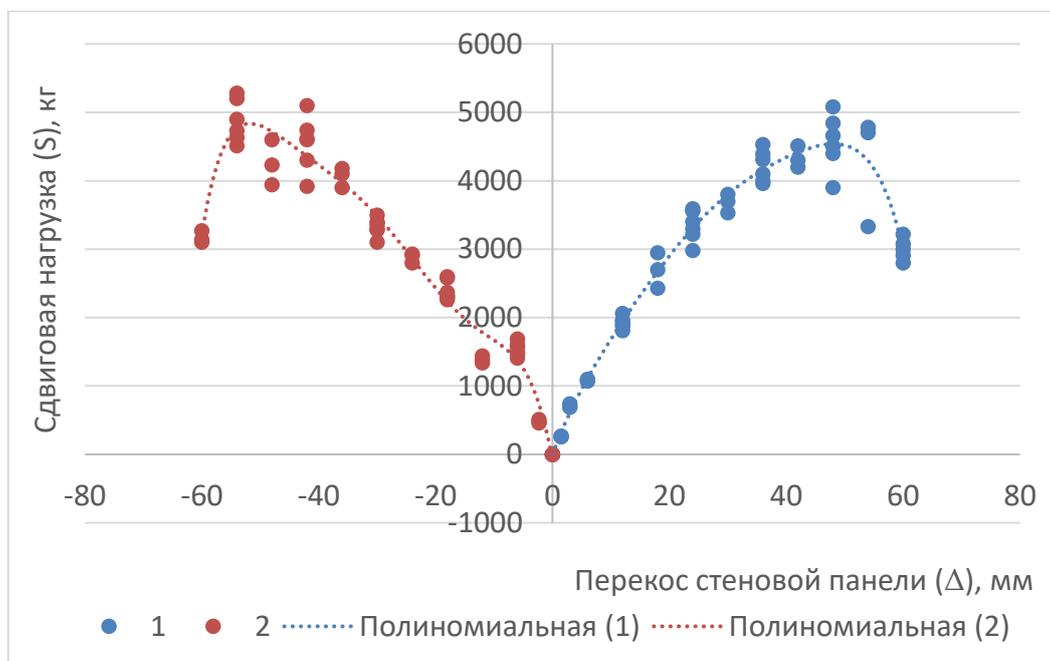


Рис.23. График аппроксимирующей функции сдвиговая нагрузка–перекос стеновой панели по данным трех испытаний образцов при переменном движении штока домкрата (приложения нагрузки) по направлению образца (синий) и против направления (красный)

Характерные повреждения, полученные в ходе испытаний панелей с однослойной обшивкой плитами ЦСП по ГОСТ 26816-2016 толщиной 10 мм с внешней (необогреваемой) стороны с шагом закрепления 150 мм, представлены на рисунках 24-25.



Рис.24. Разрушение зоны стыка соединения двух плит ЦСП



Рис.25. Характер разрушения цементно-стружечной плиты в местах крепления к стальному каркасу при помощи самонарезающих винтов.

Оценка общего динамического поведения конструктивного решения здания из ЛСТК выполнялась на образце фрагмента двухэтажного здания вибрационным (резонансным) методом, позволяющим измерить количественно силовую нагрузку, имитирующую сейсмическое воздействие в широком диапазоне частот.

При проведении динамических испытаний в качестве источника воздействия использовалась виброплатформа. Маятниковая платформа подвешена на гибких (из полосовой стали) силовых связях к опорной силовой раме. Рама жестко закреплена в силовой пол лабораторного корпуса. Возбуждение колебаний платформы осуществляется вибромашиной ВИД-12М, установленной на консоли маятниковой платформы.

Измерительные датчики для регистрации основных колебаний устанавливались в 3-х створах (по углам образца фрагмента здания) и в 3-х уровнях по высоте образца. Первый уровень представлен датчиками А1-А3, расположенными в уровне виброплатформы. Второй уровень представлен датчиками А4-А6, расположенными в уровне плиты перекрытия. Третий уровень представлен датчиками А7-А9, расположенными в уровне плиты покрытия.

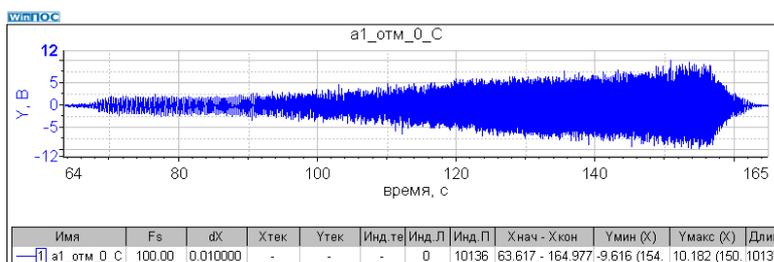
Проведены испытания фрагмента здания, нижний контур которого был жестко закреплен к горизонтальной поверхности платформы. Испытания проводились с изменением частоты и амплитуды колебаний платформы в несколько этапов.

На первом этапе был реализован режим колебания платформы с минимально возможными для платформы амплитудами и с основной частотой, изменяющейся от 0,5 до 15 Гц.

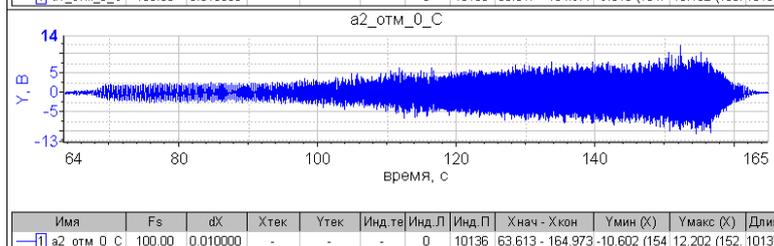
На последующих этапах были реализованы режимы колебаний платформы с максимально возможными для платформы амплитудами колебаний в области частот, где значения коэффициента динамичности для образца становятся максимальными.

На рисунке 26 приведены записи ускорений колебаний в точках 1, 2 и 3 расположенных на платформе в горизонтальном направлении (в диапазоне частот до 10 Гц). Соответствующие этим колебаниям частотные спектры приведены на рисунке 27.

а) $W1, \text{ м/с}^2$



б) $W2, \text{ м/с}^2$



в) $W3, \text{ м/с}^2$

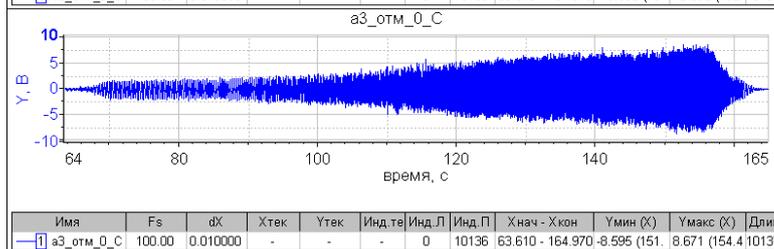
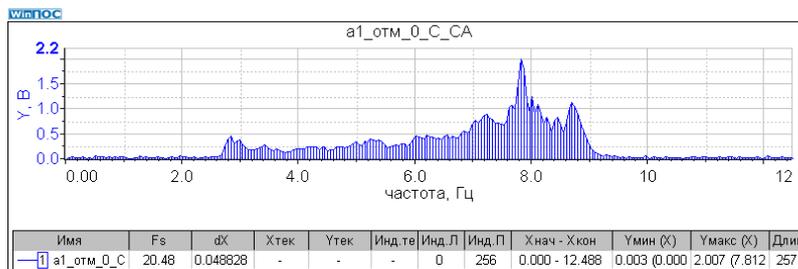
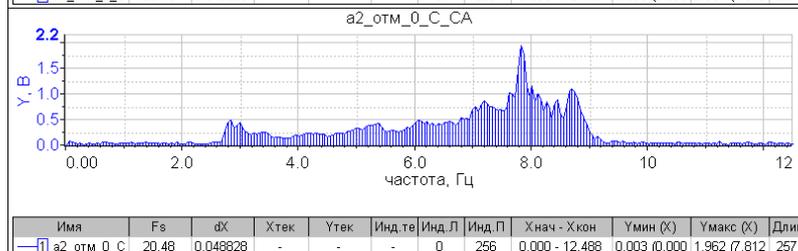


Рис.26. Записи ускорения колебаний платформы в точках 1, 2 и 3 при проведении испытания

а) A_{W1} , m/c^2



б) A_{W2} , m/c^2



в) A_{W3} , m/c^2

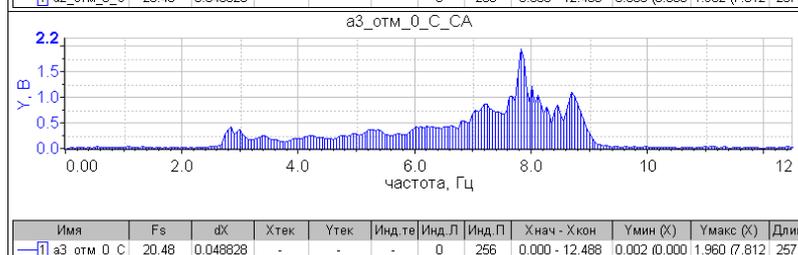
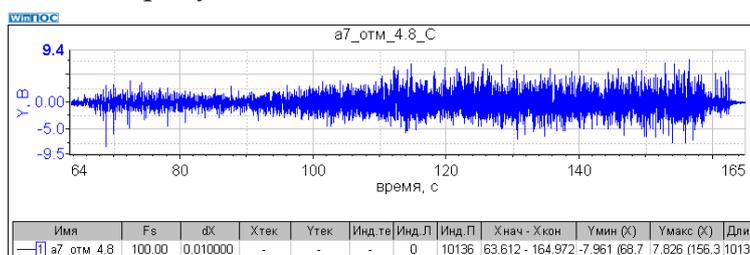


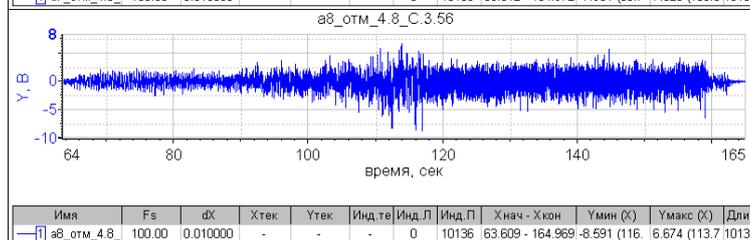
Рис.27. Спектры ускорений колебаний платформы при проведении испытания

На рисунке 28 приведена запись ускорения колебаний в точках 7, 8 и 9 расположенных на образце в уровне покрытия второго этажа в горизонтальном направлении (в диапазоне частот до 10 Гц). Соответствующие этим колебаниям частотные спектры приведены на рисунке 29.

а) $W7$, m/c^2



б) $W8$, m/c^2



в) $W9$, m/c^2

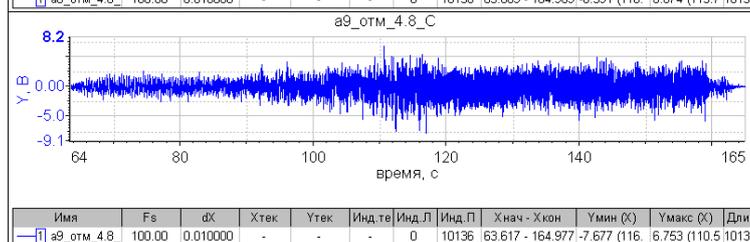
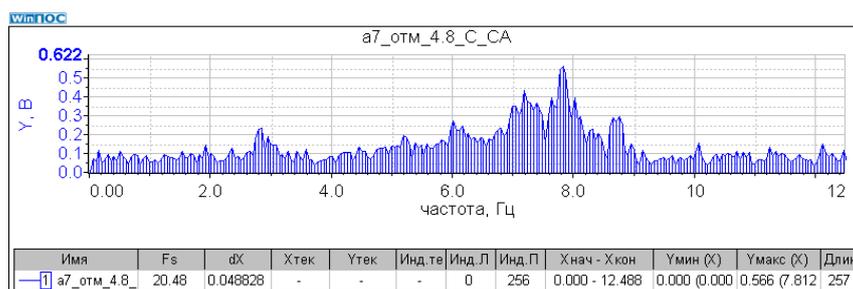
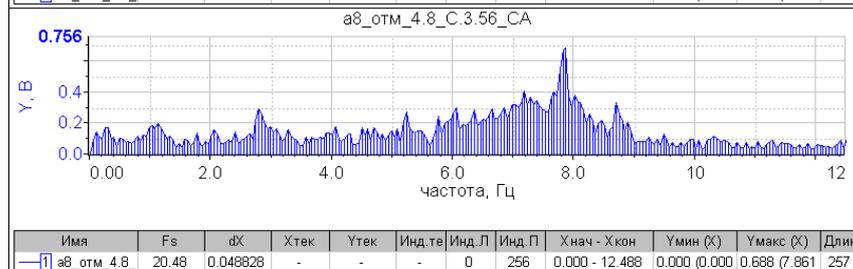


Рис.28. Записи ускорения колебаний образца в уровне покрытия 2-го этажа в точках 7, 8 и 9 при проведении испытания

а) A_{W7} , m/c^2



б) A_{W8} , m/c^2



в) A_{W9} , m/c^2

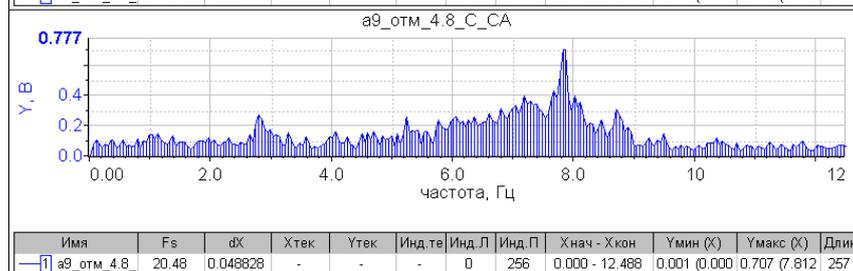


Рис.29. Спектры ускорений колебаний образца в уровне покрытия 2-го этажа при проведении испытания

В процессе испытаний ускорение виброплатформы по данным акселерометров (табл. 2.14), изменялось в интервале от 0,7 до 11 m/c^2 (точки А1-А3) в различном диапазоне частот. Ускорения фрагментов образцов по данным акселерометров изменялись в интервале от 0,6 до 7,5 m/c^2 . Полученные значения горизонтальных ускорений виброплатформы превышают значения нормативных ускорений, соответствующих 9 баллам (по шкале MSK-64 – 4 m/c^2).

Частота колебания системы изменялась в интервале от 0,5 до 10 Гц. Максимальная амплитуда горизонтальных колебаний виброплатформы составила 34 мм. Максимальная амплитуда горизонтальных колебаний фрагментов испытательных образцов по данным приборов составила 69 мм.

В процессе динамических испытаний образца фрагмента двухэтажного здания из ЛСТК, представляющего собой каркасно-обшивную несущую систему с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей, несущие конструкции и узлы соединений образца получили повреждение, соотносящиеся с повреждениями, полученными по результатам статических испытаний (отказ саморезов, повреждение распорок и связевых элементов системы, локальное разрушение обшивок).

Механическая безопасность и эксплуатационные свойства образца фрагмента двухэтажного здания из ЛСТК не были нарушены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований установлено следующее. Наибольшим сдвиговым сопротивлением, из перечня исследованных образцов, обладают каркасы с двухслойными панелями обшивок. Сдвиговое сопротивление каркасов с двухслойными панелями обшивок выше сдвигового сопротивления остальных конструктивных решений каркасов на 14,28% (относительно каркасов с однослойной панелью обшивки и шагом закрепления 150 мм), на 38,31% (относительно каркасов с X-образными вертикальными связями) и на 51,30 % (с однослойной панелью обшивки и шагом закрепления 300 мм).

По результатам проведенного анализа выработаны следующие рекомендации по выбору конструктивных решений каркасов из ЛСТК, применимых для строительства зданий и сооружений в сейсмоопасных регионах с сейсмичностью площадок 7-9 баллов по шкале MSK-64.

Для зданий со стенами из каркасно-обшивных конструкций на основе стального каркаса из холодногнутых профилей, проектируемых в районах сейсмичностью 7 баллов по шкале MSK-64, рекомендуется применять конструктивное решение каркасно-обшивных конструкций стен с однослойной обшивкой из плит ЦСП с шагом закрепления обшивки к каркасу не более 300 мм. Предельную высоту (этажность) здания при сейсмичности площадки 7 баллов по шкале MSK-64 следует принять не более 12 метров и 3-х надземных этажей.

Для зданий со стенами из каркасно-обшивных конструкций на основе стального каркаса из холодногнутых профилей, проектируемых в районах сейсмичностью 8 баллов по шкале MSK-64, рекомендуется применять конструктивное решение каркасно-обшивных конструкций стен с X-образной связью из стальных оцинкованных лент и однослойной обшивкой из плит ЦСП с шагом закрепления обшивки к каркасу не более 150 мм. Предельную высоту (этажность) здания при сейсмичности площадки 8 баллов по шкале MSK-64 следует принять не более 12 метров и 3-х надземных этажей.

Для зданий со стенами из каркасно-обшивных конструкций на основе стального каркаса из холодногнутых профилей, проектируемых в районах сейсмичностью 9 баллов по шкале MSK-64, рекомендуется применять конструктивное решение каркасно-обшивных конструкций стен с двухслойной обшивкой из ЦСП с шагом закрепления обшивки к каркасу не более 150 мм. Предельную высоту (этажность)

здания при сейсмичности площадки 9 баллов по шкале MSK-64 следует принять не более 9 метров и 2-х надземных этажей.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Allen, D.** (2006). *History of cold-formed steel. Structure Magazine, November, 2006: pp. 28–32.*
2. **AISI** (1946). *Specification for the design of light gage steel structural members, American Iron and Steel Institute, Washington, DC.*
3. **Winter, G.** (1947). “Strength of thin steel compression flanges,” *Transactions of the American Society of Civil Engineers, 112 (1), pp. 527–554, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.*
4. **Winter, G.** (1972). “Thin-walled steel for modern structures: Thirty years of industry-sponsored research at Cornell,” *ENGINEERING, Cornell Quarterly, 7 (1), pp. 2–12, doi: <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. J. Struct. Eng. 2016, 142, 04015154.*
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.*
7. СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутого оцинкованных профилей и гофрированных листов».
8. СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*».
9. **Джинчвелашвили Г.А., Соснин А.В.** Особенности применения лёгких стальных тонкостенных конструкций при строительстве зданий различного назначения в сейсмически активных регионах России // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010, № 3, С. 57–61.*
10. **AISI. S100-16 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members; American Iron and Steel Institute (AISI): Washington, DC, USA, 2016; ISBN 9781771391535.**
11. **AISI. S400-15 North American Standard for Seismic Design of Cold Formed Steel Structural Systems; American Iron and Steel Institute (AISI): Washington, DC, USA, 2015.**
12. **ASCE 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and other Structures; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2010; ISBN 9780784410851.**
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; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2004.*
15. *Shakeel S., Fiorino L., Landolfo R., Numerical evaluation of the behaviour factor of lightweight steel lateral force resisting systems according to FEMA P695. COMPDYN 2019 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete, Greece. (2019).*
16. *Adham, S.A., et al., 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.*
17. *Adham, S.A.; Avnessian, V.; Hart, G.C.; Anderson, R.W.; Elmlinger, J.; Gregory, J. Shear wall resistance of lightgage steel stud wall systems. Earthq. Spectra 1990, 6, 1–14.*
18. *Gad, E.F.; Du_eld, C.F.; Hutchinson, G.L.; Mansell, D.S.; Stark, G. Lateral performance of cold-formed steel-framed domestic structures. Eng. Struct. 1999, 21, 83–95.*
19. *Schafer, B.W.; Ayhan, D.; Leng, J.; Liu, P.; Padilla-Llano, D.; Peterman, K.D.; Stehman, M.; Buonopane, S.G.; Eatherton, M.; Madsen, R.; et al. Seismic response and engineering of cold-formed steel framed buildings. Structures 2016, 8, 197–212.*
20. *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 Saf. J. 2017, 91, 524–531.*
21. *Fiorino, L.; Macillo, V.; Landolfo, R. Shake table tests of a full-scale two-story sheathing-braced cold-formed steel building. Eng. Struct. 2017, 151, 633–647.*
22. *Fiorino, L.; Bucciero, B.; Landolfo, R. Shake table tests of three storey cold-formed steel structures with strap-braced walls. Bull. Earthq. Eng. 2019, 17, 4217–4275.*
23. *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 Proceedings of the International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, MO, USA, 3–4 November 2010; p. 1.*
24. *Nikolaidou, V.; Latreille, P.; Rogers, C.A.; Lignos, D.G. Characterization of cold-formed steel framed/woodsheathed floor and roof diaphragm structures. In Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE, Santiago, Chile, 9–13 January 2017; p. 452.*
25. *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.*
26. *Vieira, L.C.M.; Schafer, B.W. Lateral sti_ness and strength of sheathing braced cold-formed steel stud walls. Eng. Struct. 2012, 37, 205–213.*
27. *Peterman, K.D.; Nakata, N.; Schafer, B.W. Hysteretic characterization of cold-formed steel stud-to-sheathing connections. J. Constr. Steel Res. 2014, 101, 254–264.*
28. *Swensen, S.; Deierlein, G.G.; Miranda, E. Behavior of screw and adhesive connections to gypsum wallboard in wood and cold-formed steel-framed wallettes. J. Struct. Eng. 2016, 142, E4015002.*
29. *Ye, J.; Wang, X.; Zhao, M. Experimental study on shear behavior of screw connections in CFS sheathing. J. Constr. Steel Res. 2016, 121, 1–12.*
30. *Fiorino, L.; Macillo, V.; Landolfo, R. Experimental characterization of quick mechanical connecting systems for cold-formed steel structures. Adv. Struct. Eng. 2017, 20, 1098–1110.*
31. *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 Struct. 2017, 116, 234–249.*
32. *Serrette, R.; Nolan, D. Wood structural panel to cold-formed steel shear connections with pneumatically driven knurled steel pins. Pract. Period. Struct. Des. Constr. 2017, 22, 04017002.*

33. **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; pp. 1760–1773.*
34. **Wang, X.; Pantoli, E.; Hutchinson, T.C.; Restrepo, J.I.; Wood, R.L.; Hoehler, M.S.; Grzesik, P.; Sesma, F.H.** *Seismic performance of cold-formed steel wall systems in a full-scale building. J. Struct. Eng. 2015, 141, 04015014.*
35. **Magliulo, G.; Petrone, C.; Capozzi, V.; Maddaloni, G.; Lopez, P.; Manfredi, G.** *Seismic performance evaluation of plasterboard partitions via shake table tests. Bull. Earthq. Eng. 2014, 12, 1657–1677.*
36. **Fiorino, L.; Bucciero, B.; Landolfo, R.** *Evaluation of seismic dynamic behaviour of drywall partitions, façades and ceilings through shake table testing. Eng. Struct. 2019, 180, 103–123.*
37. **Badillo-Almaraz, H.; Whittaker, A.S.; Reinhorn, A.M.** *Seismic fragility of suspended ceiling systems. Earthq. Spectra 2007, 23, 21–40.*
38. **Jenkins, C.; Soroushian, S.; Rahmanishamsi, E.; Maragakis, E.M.** *Experimental fragility analysis of cold-formed steel-framed partition wall systems. Thin Walled Struct. 2016, 103, 115–127.*
39. **Бубис А.А., Гизятуллин И.Р., Дотмуев А.И., Назмеева Т.В.** *Сейсмостойкость зданий из каркасно-обшивных конструкций с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей. Вестник НИЦ «Строительство». 2021;31(4):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).*
40. **Гизятуллин 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;32(1):30-52. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-30-52](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-30-52)*