This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Review Article
Received: February 4, 2025 Accepted: February 19, 2025 Published: March 9, 2025
ISSN 2658-5553

Inter-module connections in modular construction: A comprehensive review and classification

Iakovlev, Nikita Artemovich[1]*
Khraponova, Liudmila Vladimirovna[1]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;
nik_yakovlev@list.ru (I.N.A.); hraponova_lv@spbstu.ru (K.L.V.)
Correspondence:* email nik_yakovlev@list.ru; contact phone +79811915449

Keywords:

Modular construction; Inter-module connections; Classification; Structural performance; Load-bearing capacity; Energy dissipation; Off-site construction; Welded connections; Bolted connections; Tie-rod connections; Self-locking connections

Abstract:

The object of the research is inter-module connections in modular construction, whose demand is growing as modular systems are increasingly implemented in building construction. The diversity of design solutions and the lack of a standardized classification, however, complicate their systematization and application in practice. Current review articles either focus on a limited range of connection types or provide broad classifications, lacking the depth needed to fully cover various aspects of connection design and functionality. The study aimed to address the need for a comprehensive approach by developing a detailed and structured classification of inter-module connections and conducting an in-depth review and analysis of various connection types. **Method**. A systematic literature review was conducted using Scopus, Google Scholar, and eLibrary to gather relevant sources. Subsequently, a bibliometric analysis and keyword content analysis were performed on the collected literature using VOSviewer. **Results**. The study proposes a new, detailed classification of inter-module connections, considering design characteristics and connection methods. Additionally, a thorough analysis was conducted on specific connection types, including welded, bolted, self-locking, and tie-rod connections, with an evaluation of their strengths and weaknesses under different construction conditions. A comparative analysis was also conducted based on parameters such as load-bearing capacity, deformation resistance, assembly speed, and ease of installation. The study identifies distinct features that influence connection selection based on project-specific requirements, thereby contributing to the systematic understanding of modular construction.

1 Introduction

Начиная с 2010-х годов все больше внимания уделяется разработке систем строительства модульных зданий [1]. Модульные здания – это здания, возводимые из унифицированных объемных модулей [2]. В соответствии с классификацией элементов внеплощадочного (сборного) строительства, модули являются одним объемными элементами здания. Также существуют линейные и панельные (плоские) элементы [3].

Особенностью модульного строительства является возведение здания из фабрично изготовленных объемных модулей (с готовыми конструкциями, отделкой и т.д.), каждый из которых является самостоятельным строительным элементом [4]. Готовые модули доставляются на строительную площадку и собираются на месте для возведения целого здания или его части [5,6]. Поэтому конструкция каждого модуля должна соответствовать требованиям прочности, устойчивости и жесткости, как на уровне отдельного элемента, так и в составе общего здания [2].

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Модульные здания прочно завоевали свою нишу в строительстве. Их использование в мало- и среднеэтажных объектах с повторяющимися блоками является распространенной практикой в мировой строительной отрасли [7]. Из модулей строятся строительные городки, военные корпуса, общежития, школы, больницы, церкви и жилые здания [4], [8].

Модульное строительство является перспективной альтернативой для строительства многоэтажных зданий, например жилых [9]. Уже существует несколько успешных проектов многоэтажных модульных зданий, например, 32-этажное жилое здание 416 Dean в Нью-Йорке, США, а также 13-этажный гибридный жилой дом в Токио, Япония, состоящий железобетонного ядра и модульных блоков [10].

Модульное строительство обладает рядом преимуществ перед традиционным строительством. Одним из главных преимуществ является высокая скорость возведения здания [3], [5]. Она обеспечивается тем, что основная часть работ выполняется в заводских условиях [6]. За счет переноса в заводские условия снижается трудоемкость и себестоимость работ на строительной площадке и при этом повышается качество строительства [10]–[12]. Другими преимуществами можно выделить возможность демонтажа и повторного использования модулей [13], а также минимизацию негативного воздействия на окружающую среду за счет сокращения строительных отходов [12]–[14].

Однако у модульных технологий существуют и недостатки модульных технологий. Например, применение модульного строительства для высотных зданий затруднено из-за необходимости обеспечения жесткости и устойчивости конструкции [3]. Также модули ограничены в размерах из-за трудностей их транспортировки к строительной площадке [12]–[14]. Имеют место повышенные требования к проектированию и точности монтажа [10], а также необходимы строительные краны повышенной грузоподъемности [3].

Модули изготавливаются из дерева, бетона, стали, алюминия [15], [16]. Также бывают композитные решения, например, из стали и бетона. Однако стальные модульные конструкции остаются самыми часто используемыми.

По конструкции каркаса модулей можно выделить: модули с опорными угловыми колоннами, модули с несущими стенами и ненесущие модули [5], [17]. Наибольшее распространение, особенно в высотных зданиях, получили модули с опорными колоннами, которые обеспечивают большую гибкость планировки по сравнению с системами с несущими стенами [2].

По сравнению с традиционными конструкциями, в модульных конструкциях используется гораздо больше соединений [14]. Важным аспектом является правильное соединение всех модульных элементов для передачи сдвиговых, изгибающих, боковых и осевых нагрузок, что влияет на общую стабильность и прочность конструкции [18].

Соединения в модульных конструкциях разделяются на: внутримодульные, межмодульные; соединения модуля с фундаментом или ядром жесткости [1], [3], [17] (см. рисунок 1).

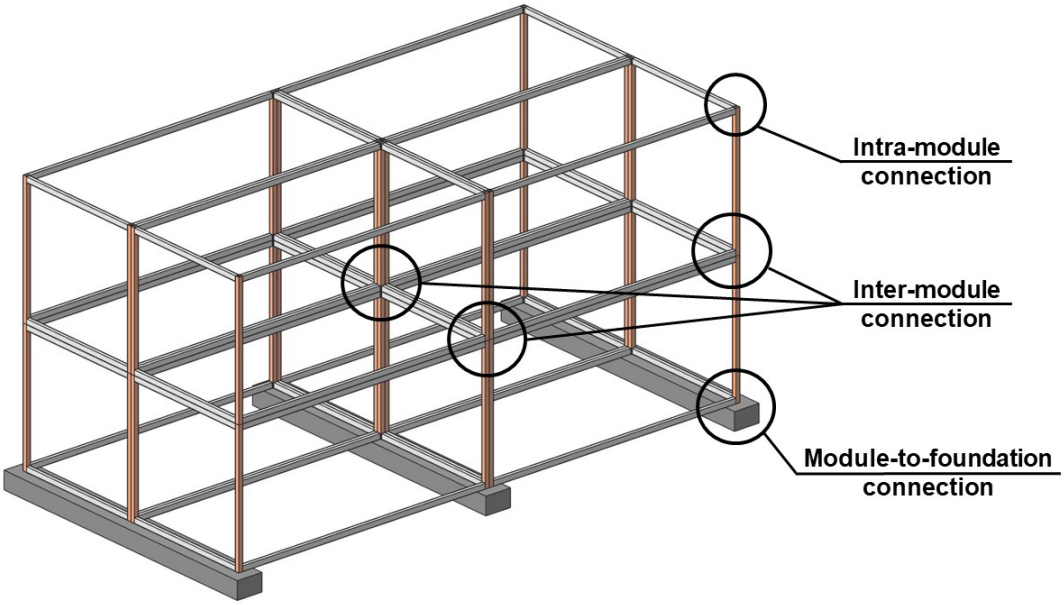


Рис. 1 – Виды модульных соединений
Fig. 1 - Types of modular connections

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Внутримодульные соединения реализуются с применением традиционных конструктивных решений. Поэтому достаточно хорошо изучены и не представляют первоочередного интереса для исследования. При этом межмодульные соединения, имеющие в большинстве своем нетиповые конструктивные решения, нуждаются в исследовании и разработке подходов к анализу и расчету [19]. Поэтому они привлекают к себе все больше внимания инженеров и исследователей [20].

Межмодульные соединения – это узлы, с помощью которых осуществляется стыковка отдельных модулей друг с другом, образуя единое здание. Они обеспечивают как прочное скрепление каркаса, так и вертикальную передачу гравитационных нагрузок и горизонтальную передачу боковых нагрузок между модулями. Общая структурная стабильность и прочность сборки модулей в значительной степени зависят от поведения межмодульных соединений [12], [13], [18]. Поэтому они являются одним из важнейших элементов модульных зданий [6]. В случае сейсмической нагрузки они также вносят значительный вклад в рассеивание энергии [21], [22].

Соединения бетонных модулей требуют значительных трудозатрат на укладку арматуры и затирку швов, что снижает скорость строительства и нивелирует преимущества модульного строительства для многоэтажных зданий [17]. Таким образом, в данном обзоре будут рассматриваться только стальные межмодульные соединения, тем более что они применяются и для деревянных, и для композитных модулей.

В условиях глобальной тенденции к строительству высотных зданий для размещения растущего населения проектирование межмодульных соединений сталкивается с новыми вызовами, связанными с обеспечением боковой устойчивости и динамических характеристик. В этом контексте важным фактором является пластичность соединений, позволяющая эффективно противостоять сдвиговым и растягивающим нагрузкам, а также обеспечивать рассеивание энергии для предотвращения хрупких и внезапных разрушений. Кроме того, избыточная прочность и пластичность соединений необходимы для перераспределения нагрузок в случае повреждения части конструкции, что предотвращает прогрессивное обрушение всей конструкции [23].

Помимо вышеперечисленных трудностей межмодульные соединения имеют и иные проблемы. Так большая часть существующих соединений не может полностью удовлетворить требования к целостности модулей, так как процесс их монтажа нарушает отделку полностью готовых модулей [12]. Также можно отметить большое разнообразие нетрадиционных межмодульных соединений с разными особенностями и элементами, что усложняет их классификацию, стандартизацию и процесс проектирования [19].

В различных научных статьях упоминается необходимость разработки новых методов расчета и анализа конструкций модульных зданий, а также создания новых нормативных стандартов для их проектирования. Имеющиеся на момент 2024 года нормативные документы, основанные на традиционных подходах к проектированию, не учитывают специфические особенности модульного строительства, включая заводское производство, поэтапный монтаж, временные нагрузки при транспортировке и сборке, а также геометрические отклонения, что приводит к несоответствию расчетов реальным условиям эксплуатации [6], [12], [17]. В частности, в работе [24] отмечается недостаточная изученность механизмов передачи нагрузок через межмодульные соединения, влияние дискретного перекрытия на жесткость конструкции, а также их поведение в условиях сейсмических воздействий. В российской практике свод правил СП 501.1325800.2021 «Здания из крупногабаритных модулей» регламентирует только проектирование железобетонных модульных зданий, не рассматривая применение стальных и деревянных модулей, что ограничивает их развитие [19].

Несмотря на многолетние дискуссии, консенсус среди исследователей по поводу экономически выгодного и простого в строительстве дизайна межмодульных соединений еще не достигнут [24].

Хотя существует ряд обзорных статей по теме межмодульных соединений, большинство из них либо не предлагают четкой и структурированной классификации, либо рассматривают лишь несколько ключевых типов соединений, что приводит к недостаточной систематизации. В некоторых статьях предложенные классификации слишком обобщенные, не позволяющие детально охарактеризовать разнообразие межмодульных соединений, используемых в практике. Более того, определенные типы соединений нередко перемещаются из одной категории в другую в разных обзорах, что затрудняет их однозначное определение. Настоящая работа стремится восполнить этот пробел, предлагая подробную и согласованную классификацию, а также давая

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

углубленный анализ различных типов межмодульных соединений, их характеристик и применения.

Объектом исследования являются межмодульные соединения в модульном строительстве.

Предмет исследования – это особенности, механические, прочностные и монтажные характеристики межмодульных соединений.

Целью статьи является проведение комплексного обзора существующих технологий межмодульных соединений модульных зданий и предложение систематизированной классификации для данных соединений, которая способна масштабироваться и расширяться по мере появления новых соединений.

Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

1. Провести количественный анализ литературы в области межмодульных соединений с 2000 по 2024 год;
2. Проанализировать имеющиеся на момент 2024 года технологии межмодульных соединений;
3. Создать достаточно подробную и универсальную классификацию межмодульных соединений по способу соединения;
4. Изучить механические, конструктивные и монтажные характеристики каждого типа соединений;
5. Провести сравнительный анализ типов межмодульных соединений и определить их основные преимущества, недостатки и область применения.

2 Literature search methods

В процессе подготовки обзорной статьи был использован систематический подход к поиску и отбору источников по теме межмодульных соединений за период с 2000 по 2024 год. Основным инструментом для поиска научной литературы стала база данных Scopus. Поисковый запрос был сформирован с использованием ключевых слов и фраз, наиболее релевантных теме исследования: TITLE-ABS-KEY ("inter-modular connection" OR "inter-module connection" OR "inter-modular joint") AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI")). Данный поиск позволил выявить основную массу актуальных публикаций, посвященных различным аспектам межмодульных соединений в инженерных и строительных проектах.

Далее был дополнительно использован метод обратного поиска по пристатейным ссылкам, а также анализ цитирований ключевых статей. Это позволило обнаружить дополнительные источники, которые не были охвачены первичным запросом, но играли важную роль в развитии темы.

Кроме того, был проведен поиск в Google Scholar, который, как известно, индексирует более широкий круг публикаций, включая диссертации и конференционные материалы, что также способствовало расширению библиографической базы.

Для поиска русскоязычных публикаций использовалась электронная библиотека Elibrary, где осуществлялся ручной поиск по запросам «Межмодульные соединения» и «Модульные конструкции». Отбирались только те статьи, которые имели международный идентификатор DOI, что обеспечивало их академическую значимость и доступность. В результате анализа было отобрано три статьи, релевантные теме обзора.

Количественный анализ проводился на основе данных, полученных в Scopus.

Для визуализации и картирования исследуемой предметной области использована программа VOSviewer (www.vosviewer.com). Это позволило структурировать и систематизировать основную терминологию и ключевые направления исследований в области межмодульных соединений. Среди найденных публикаций вручную отбирались работы с открытым доступом к полному тексту для дальнейшего изучения и анализа.

3 Literature review

3.1 Quantitative literature analysis / Количественный анализ литературы

Количественный анализ литературы в базе данных Scopus показывает, что активное изучение межмодульных соединений началось в 2019 году. На рисунке 2 показано распределение публикаций по годам. До 2019 года наблюдается очень низкий уровень публикаций (до 5

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

публикаций в год). Однако начиная с 2018 года наблюдается резкий рост, который достигает пика в 2023 году с более чем 40 публикациями. Данный рост может свидетельствовать о повышении интереса исследовательского сообщества к вопросам межмодульных соединений в связи с активным развитием модульного строительства. Также стоит отметить, что начиная с 2016 года на момент проведения обзора прошло 8 лет, что говорит о том, что направления исследования межмодульных соединений довольно молодое. В будущем ожидается дальнейшее увеличение количества исследований по данной теме.

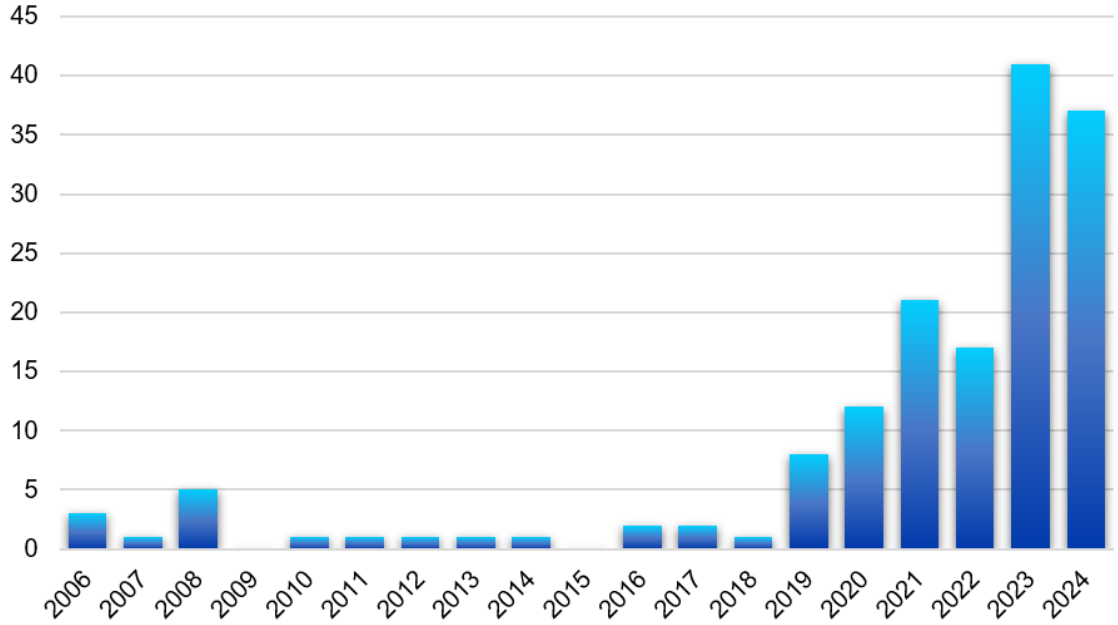


Рис. 2 – Распределение публикаций по годам 2000–2024
Fig. 2 – Distribution publications in 2000–2024

Активнее всего исследования межмодульных соединений проводятся в Китае, как видно из диаграммы на рисунке 3. На него приходится 67 публикаций, что составляет 44% от общего количества публикаций (152). На втором месте находится Австралия с 39 публикациями (примерно 26%) за ней следует Великобритания (17 статей, что составляет примерно 11%). Другие страны, такие как Иран, Канада, Сингапур и Малайзия, показывают значительно меньшее количество публикаций. Для России и США установлено минимальное количество публикаций, что может свидетельствовать о том, что в этих странах модульное строительство и исследования по межмодульным соединениям менее развиты или не столь популярны среди ученых.

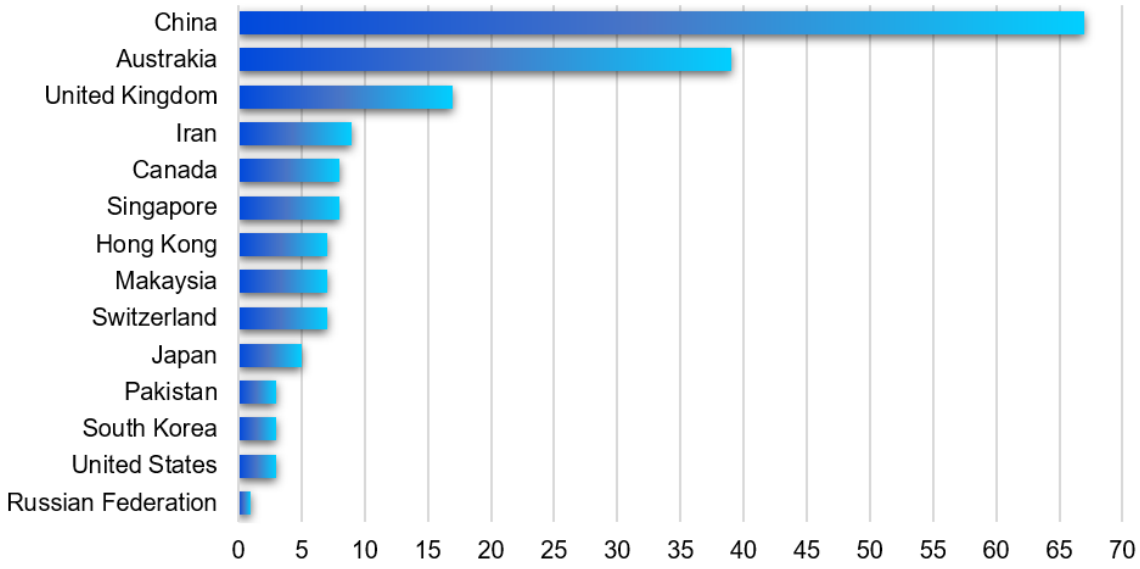


Рис. 3. – Распределение публикаций по странам
Fig. 3 – Distribution of publications by country

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

График распределения публикаций по журналам, представленный на рисунке 4, демонстрирует, что основная часть исследований в области межмодульных соединений сосредоточена в нескольких изданиях. Лидером является журнал «Journal Of Construction Steel Research», в котором опубликовано на момент проведения обзора 24 статьи. Это объясняется тем, что самыми распространенными модульными конструкциями являются стальные. Следующие 6 журналов также внесли значительный вклад в развитие данной научной области. Остальные журналы имеют не более двух публикаций. Тематические и узкоспециализированные журналы по строительным и инженерным дисциплинам играют ключевую роль в распространении исследований по межмодульным соединениям.

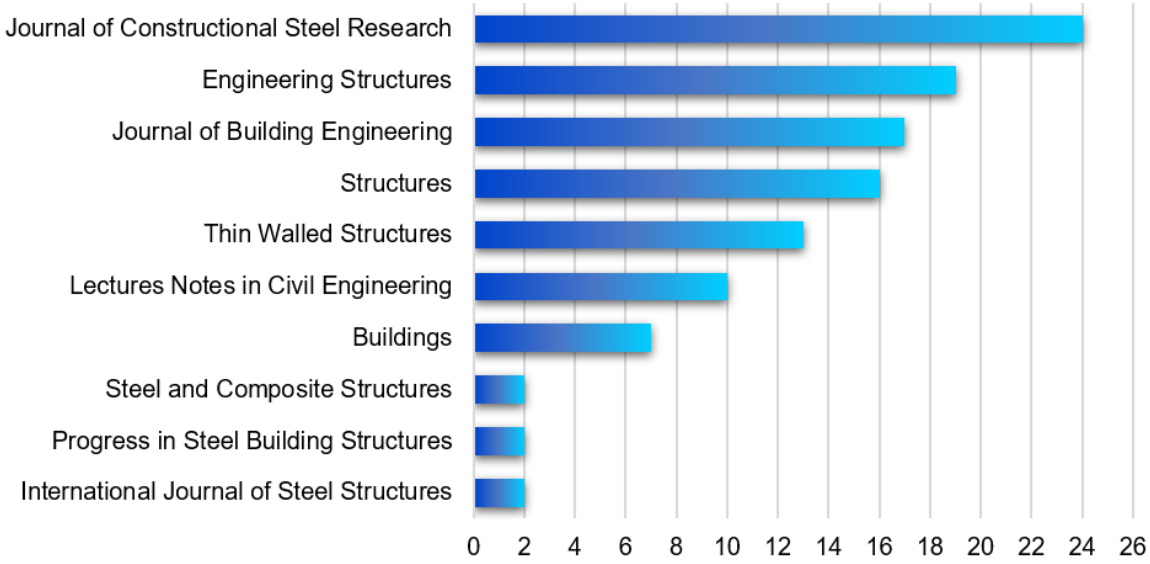


Рис. 4 – Распределение публикаций по журналам
Fig. 4 – Distribution of publications by journal

Анализ авторов показывает, что исследовательская активность в данной области сосредоточена среди ограниченного круга экспертов, преимущественно из Китая. В соответствии с рисунком 5, лидерами по количеству публикаций являются Chen Z. и Liu J., имеющих 19 и 17 работ соответственно. Остальные авторы имеют не более 10 публикаций. Это может указывать на необходимость междисциплинарного подхода и расширения числа исследователей, вовлеченных в изучение данной темы.

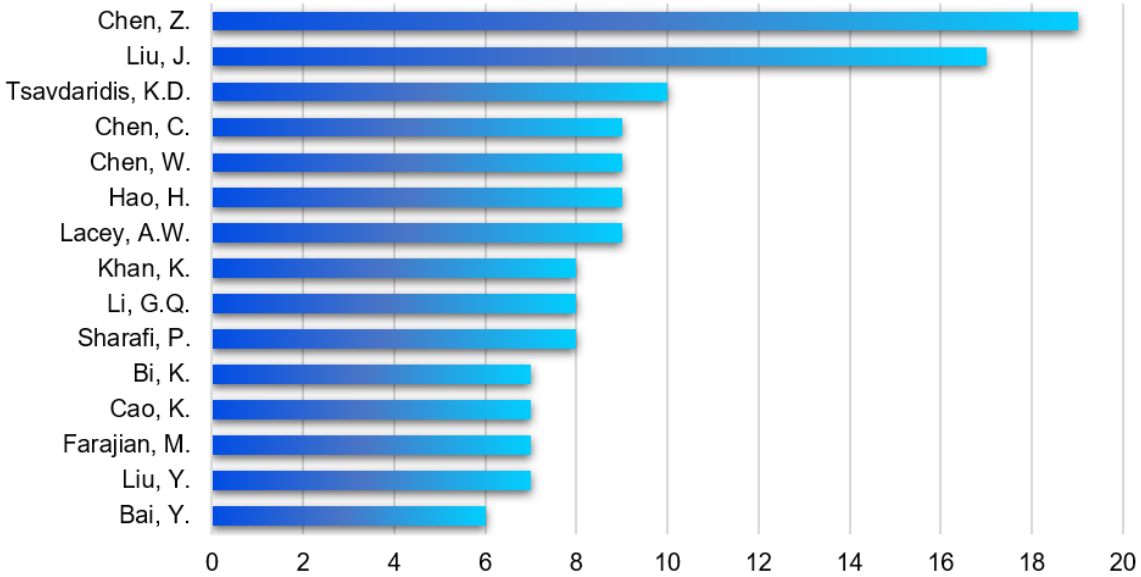


Рис. 5 – Топ-15 авторов по количеству публикаций
Fig. 5 – Top 15 authors by number of publications

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Карты ключевых слов исследуемой научной области по тематическим кластерам и по дате публикации, созданные в программе VOSviewer, представлены на рисунках 6 и 7.

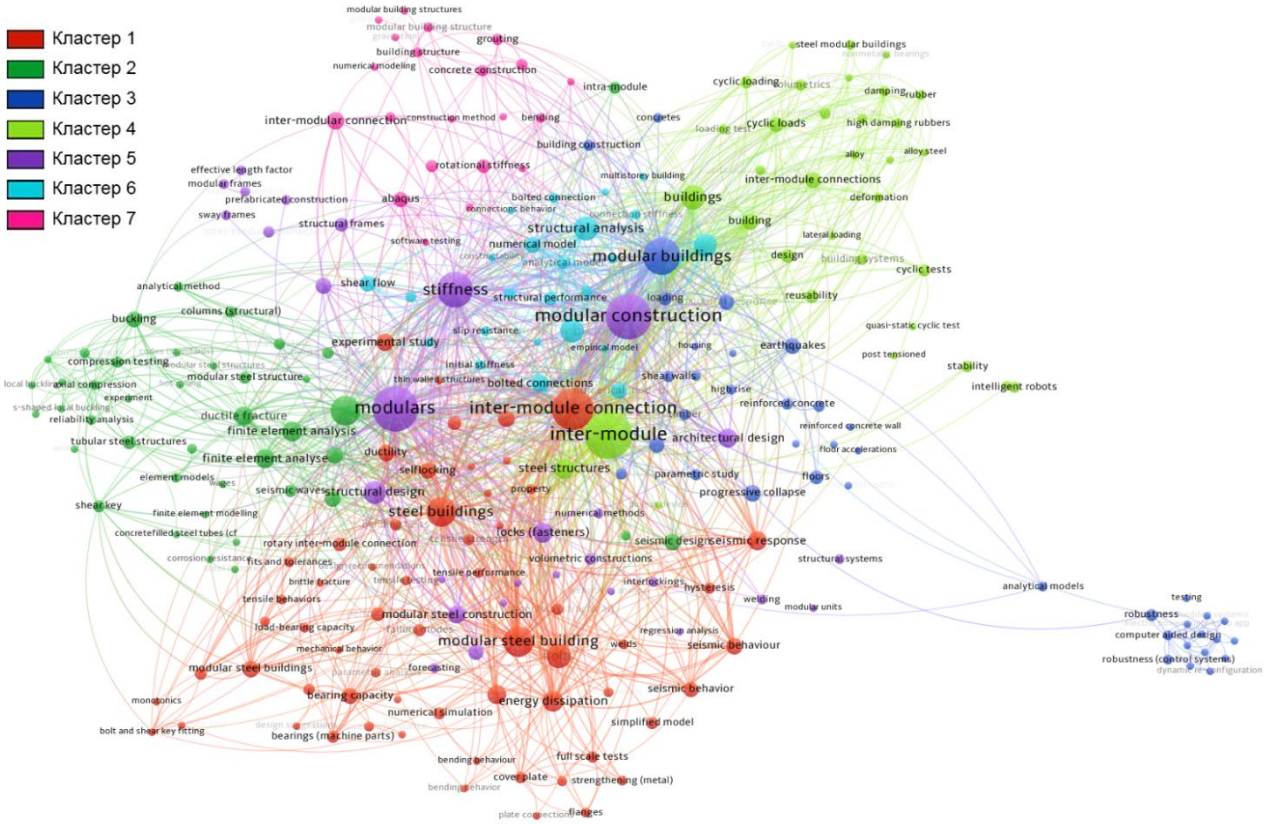


Рис. 6 – Карта ключевых слов научной области с разбиением на кластеры по тематикам
Fig. 6 – Keyword map of scientific field with clustering by topic

На рисунке 6 можно выделить семь тематических кластеров, каждый из которых соответствует определенной области исследований, связанных с межмодульными соединениями.

Кластер 1 (61 элемент) включает ключевые слова, связанные с механическими характеристиками соединений, такими как несущая способность, сопротивление на растяжение и модульные конструкции из стали. Этот кластер фокусируется на структурных свойствах соединений, методах испытаний и расчетах на прочность.

Кластер 2 (41 элемент) охватывает тему осевого сжатия, локальной устойчивости и анализов методом конечных элементов.

Кластер 3 (40 элементов) фокусируется на исследованиях в области прогрессивного обрушения и высотных зданий. Этот кластер важен для понимания динамического поведения модульных систем и их устойчивости к землетрясениям.

Кластер 4 (34 элемента) объединяет исследования по циклическим нагрузкам, сборке конструкций и резинам с высоким демпфированием. Здесь основное внимание уделяется циклическим испытаниям и поведению материалов при повторяющихся нагрузках.

Кластер 5 (29 элементов) включает ключевые слова, связанные с модульным строительством и прогнозированием устойчивости, что важно для теоретического анализа и моделирования будущих структурных решений в области модульных зданий.

Кластер 6 (24 элемента) исследует жесткость соединений и поведение болтовых соединений, что подчеркивает важность экспериментальных и численных исследований для понимания работы узловых соединений в модульных конструкциях.

Кластер 7 (21 элемент) охватывает темы, связанные с гравитационными силами, компьютерным моделированием и сопротивлением на изгиб. Данный кластер представляет собой комплекс исследований по моделированию и расчетам силовых воздействий на модульные соединения в многоэтажных зданиях.

Группировка терминов по кластерам указывает на основные направления исследований, при этом кластеры указывают на различия в фокусах исследований. Например, появление таких

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

терминов, как «болтовые соединения» и «осевое сжатие» в определённых кластерах подчеркивает их актуальность. Термины, такие как «метод конечных элементов» и «хрупкое разрушение» имеют сильные связи с другими терминами, что свидетельствует об их центральной роли в обсуждениях. Кроме того, кластеры показывают устойчивый интерес к материалам, методам и проектам, связанным с устойчивостью конструкций, с акцентом на циклические испытания и моделирование методом конечных элементов. Часто исследуемыми темами являются несущая способность, динамическое и сейсмическое поведение. Данные демонстрируют связь между практическим применением и вычислительными методами для решения инженерных задач.

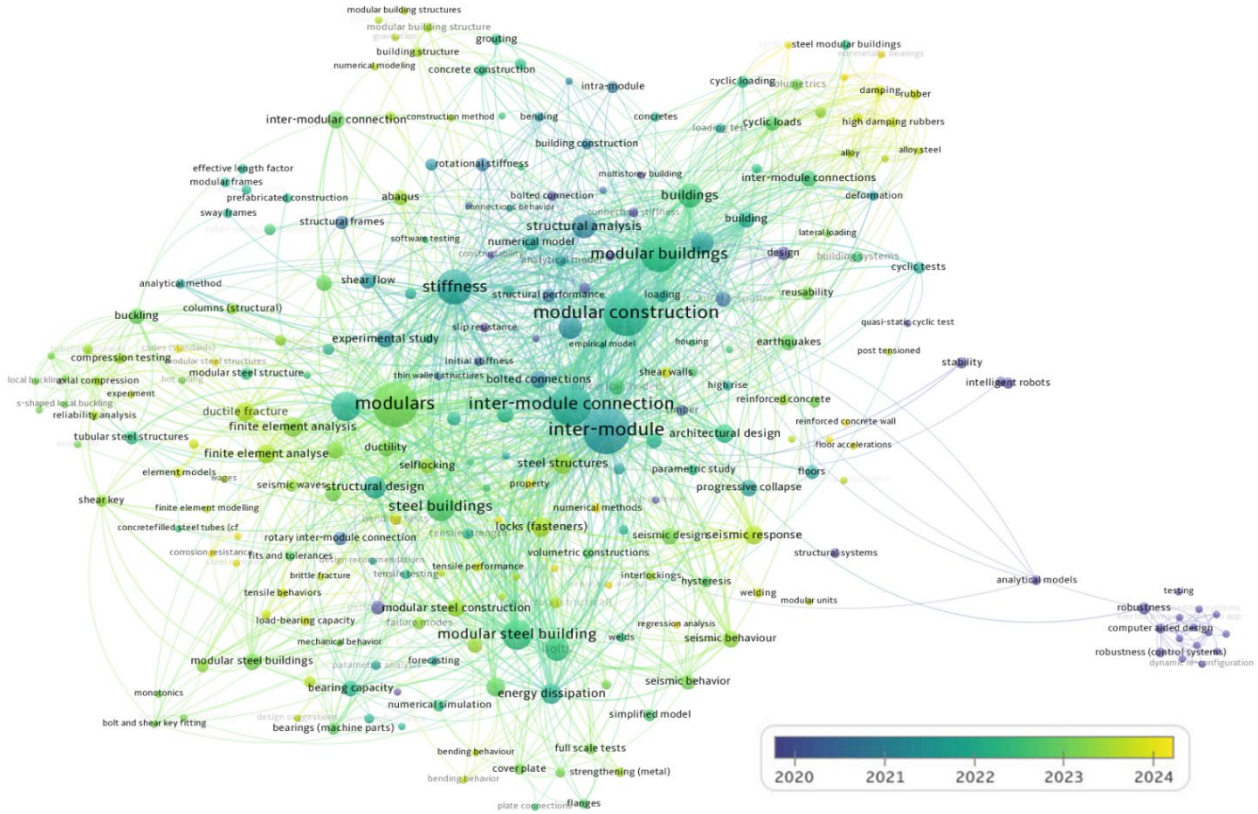


Рис. 7 – Карта ключевых слов научной области по дате публикации
Fig. 7 – Keyword map of scientific field by publication date

Анализ карты на рисунке 7 показал, что 2023 год является средним годом публикаций для многих терминов, что указывает на актуальность данных, а исследования в области осевых нагрузок, болтовых соединений и испытаний на изгиб продолжают развиваться. Также стоит отметить, что такие ключевые слова, как «численный анализ» и «стандарты» чаще встречаются в 2024 году, говорит об актуальности методов численного моделирования и возрастающей необходимости развития стандартов и нормативных документов в области модульного строительства.

3.2 Inter-module connection classification / Классификация межмодульных соединений

Жесткость, прочность и пластичность соединений оказывают важное влияние на такие параметры конструкций, как общая устойчивость, эксплуатационные характеристики и безопасность. Кроме того, количество соединений существенно влияет на затраты и время монтажа: материальные расходы составляют примерно 20-40%, а затраты на проектирование, изготовление и монтаж составляют 60-80% от общей стоимости [1].

От соединений традиционных стальных конструкций межмодульные конструкции отличаются тем, что как правило соединяют сразу несколько модулей, в результат чего образуются узлы с несколькими балками и колоннами [25].

Межмодульные соединения по месту расположения в конструкции модульного здания обычно разделяются на угловые, боковые и внутренние (см. рис. 8) [6,11,17]. Угловые

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

межмодульные соединения расположены на внешних углах модульных зданий и соединяют вертикально два соседних модуля. Боковые соединения расположены на внешних гранях здания и соединяют по четыре модуля одновременно. Эти соединения отвечают за обеспечение общей стабильности здания по горизонтальной плоскости [19]. Внутренние соединения располагаются внутри здания и обеспечивают соединение восьми модулей одновременно. Внутренние соединения испытывают значительные нагрузки, особенно в многоэтажных зданиях, так как воспринимают усилия, передающиеся через все этажи конструкции [26,27].

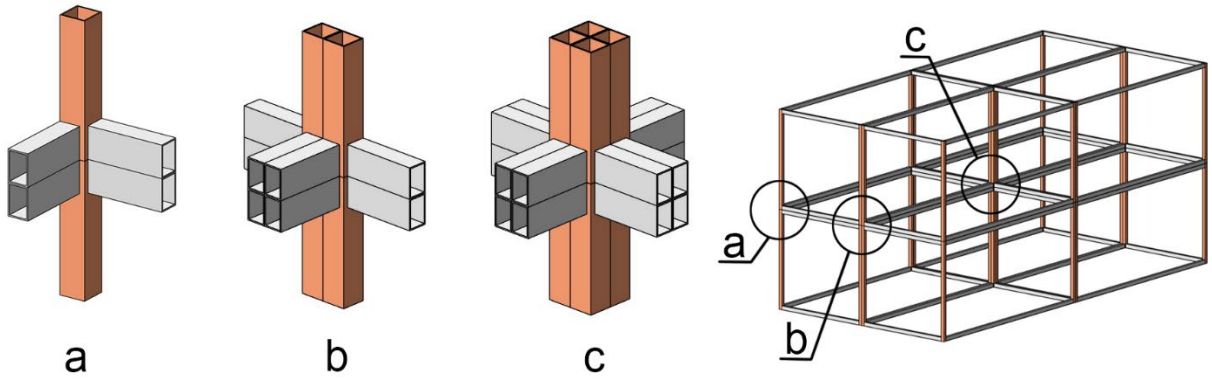


Рис. 8 – Типы межмодульных соединений по месту расположения в модульной конструкции: (a) угловое соединение, (b) боковое соединение, (c) внутреннее соединение
Fig. 8 – Types of inter-module joints by location in the modular building structure: (a) corner joint, (b) lateral joint, (c) inner joint

В работах [14], [15], [26], [28], [29] используется классификация межмодульных соединений по направлению обеспечиваемой связи между модулями:

- Вертикальные соединения (VC – vertical connection) обеспечивают вертикальную связь между вышележащим и нижележащим модулями;
- Горизонтальные соединения (HC – horizontal connection) обеспечивают горизонтальную связь между смежными в плане модулями;
- Комбинированные соединения (VH – vertical and horizontal) обеспечивают связь и по вертикали, и по горизонтали.

Также стоит отметить, что в исследованиях применительно к межмодульным стальным соединениям часто применяется классификация узлов в зависимости от их жесткости [30] в соответствии с Еврокодом 3: жесткие (rigid), полужесткие (semi-rigid) и условно скрепленные (nominally pinned).

В имеющихся источниках межмодульные соединения по-разному классифицируются по способу соединения или не классифицируются вовсе. На момент написания статьи нет единой общепринятой классификации. В итоге за основу была взята и доработана классификация в работах [28] и [16], так как она наиболее полно отражает особенности различных соединений.

Итоговая предлагаемая классификация межмодульных соединений по способу соединения и соединяющим элементам имеет следующий вид:

1. Сварные межмодульные соединения (W)
2. Болтовые межмодульные соединения
   - 2.1. Болтовые колонные межмодульные соединения (C)
     - 2.1.1. С фланцевыми и/или торцевыми пластинами
     - 2.1.2. С фасонками (соединительными пластинами)
   - 2.2. Болтовые балочные межмодульные соединения (B)
     - 2.2.1. Без вставного элемента
     - 2.2.2. Со вставным элементом
   - 2.3. Болтовые межмодульные соединения с соединительными блоками (F)
3. Самозапирающиеся межмодульные соединения (L)
4. Натяжные стержневые межмодульные соединения (R)

В данной классификации сейсмические соединения (соединения со специальными демпферными элементами) не были выделены в отдельную категорию, так как они в своей основе базируются на существующих типах соединений, представленных в классификации. Таким образом, в данном исследовании сейсмические соединения распределены по имеющимся категориям и рассматриваются в контексте их основных характеристик.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

3.3 Welded inter-module connections / Сварные межмодульные соединения

Сварные межмодульные соединения представляют собой надежный и высокопрочный вариант крепления модулей, а также он обеспечивает гибкость установки модулей и компактность самих соединений [31]. Однако сварные соединения имеют ряд значительных недостатков. Основной проблемой является их трудоемкость и невозможность разборки после монтажа, что противоречит самому концепту модульных зданий [2]. Такие соединения требуют высококвалифицированного труда, большого рабочего пространства и значительных временных затрат [6], [17], [23]. К тому же сварные узлы требуют тщательной проверки качества, что усложняет их применение в массовом строительстве. Сварные соединения также существенно затрудняют демонтаж конструкций, что противоречит идеям устойчивого строительства, требующего гибкости и возможности повторного использования модулей.

Тем не менее, сварные соединения обладают рядом преимуществ [16]. Они обеспечивают высокую несущую способность и компактность узлов по сравнению с болтовыми соединениями, что особенно важно при ограниченном пространстве в местах стыковки модулей. Благодаря высокой жесткости сварных соединений, можно не учитывать дополнительные деформации при проектировании конструкций, что повышает надежность и долговечность здания.

Однако, несмотря на их прочностные характеристики, сварные соединения не являются предпочтительными для межмодульных соединений, производимых на строительной площадке. Из-за описанных недостатков сварные межмодульные соединения на данный момент не исследуются [16]. Фокус исследователей направлен на развитие других более популярных и перспективных видов соединений. Но сварные соединения активно применяются в сборке самих модулей и внутримодульных соединениях, производимых в заводских условиях.

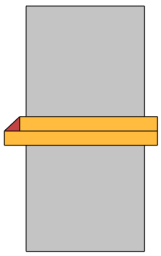
Далее и в таблице 1 описаны сварные соединения (W1, W2).

В работах [32], [33] исследовано межмодульное соединение (W1), конструкция которого очень похожа на традиционное сварное колонное соединение металлоконструкций. Связь осуществляется за счет сварки нижней торцевой пластины колонны верхнего модуля и верхней торцевой пластины колонны нижнего модуля. Соединение обеспечивает высокую прочность и жесткость, но требует особого проектирования, особенно для того, чтобы минимизировать нежелательные эффекты при сейсмических воздействиях.

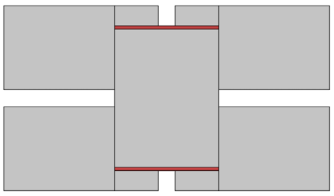
Исследуемое в статье [34] межмодульное соединение (W2), применяемое в многоэтажных стальных модульных зданиях, включает вертикальные соединения колонн, которые обеспечивают вертикальную связь между модулями. Горизонтальные соединения реализованы с использованием стальных пластин или сварных уголков, закрепленных болтами на углах модулей. Преимуществом является высокая устойчивость конструкции к боковым нагрузкам за счет большего числа колонн, чем в традиционных стальных зданиях, что повышает предельное сопротивление сдвигу.

Статья [34] написана в 2016 году и является на данный момент последним исследованием чисто сварного соединения. К тому же в ней утверждается, что данное соединение (W2) имеет альтернативный способ установки с использованием болтов.

Таблица 1. Сварные межмодульные соединения
Table 1. Welded inter-modular connections

№	Тип по месту и направ-лению связи	Основные соединяющие элементы	Иллюстрация [Источник]	Ключевые особенности
W1	Угловое, боковое - VC	1) Торцевые пластины 2) Сварной шов	 [15], [32], [33]	- Классическое сварное соединение стальных колонн; - Сварка торцевых пластин обеспечивает вертикальную связь; - Высокая прочность и жесткость.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

W2	Боковое - VH	1) Накладная пластина 2) Сварные швы	 [34]	- Вертикальная связь обеспечивается сваркой колонн; - Горизонтальная связь обеспечивается сваркой стальных накладных пластин; - Высокая устойчивость к боковым нагрузкам.

3.4 Bolted inter-module connections / Болтовые межмодульные соединения

Болтовые межмодульные соединения широко используются в модульном строительстве благодаря их простоте монтажа, возможностью быстрой разборки и повторного использования модулей [35]. Одним из ключевых преимуществ таких соединений является легкость установки на строительной площадке, что делает их предпочтительными по сравнению со сварными узлами, которые требуют квалифицированного персонала, значительных временных затрат и ограниченного пространства для выполнения всех сварочных работ [17]–[19], [27].

Также болтовые соединения более универсальны и экономичны при стандартных условиях эксплуатации, особенно для модульных конструкций, где требуется быстрая сборка и демонтаж. Однако данные соединения требуют точной установки модуля на строительной площадке, что налагает жесткие требования к допускам. Это приводит к проблеме накопления допусков при возведении многоэтажных зданий, что увеличивает риск значительных смещений при воздействии на конструкцию сильных горизонтальных нагрузок. Чтобы предотвратить такие смещения, болтовые соединения должны иметь минимальные допуски [31].

Болтовые соединения обеспечивают эффективное распределение нагрузок между модулями, повышая общую устойчивость конструкции, а также предотвращают термические деформации и повреждения отделочных материалов, характерные для сварки. Также болтовые соединения разрушаются только при достижении предельной нагрузки, что дает значительный простор для использования несущей способности соединенных элементов [5].

Болтовые фланцевые соединения получили большое распространение в строительстве многоэтажных модульных зданий [19]. Различные методы болтовых соединений, такие как использование вставных элементов, фланцев и соединительных пластин, позволяют надежно соединять модули, передавая вертикальные и горизонтальные нагрузки.

Болтовые соединения являются самым разнообразным и крупным классом межмодульных соединений. В нем огромное количество различных конфигураций, которые включают уголковые крепления, пластины, болты, гайки, шайбы, а также дополнительные элементы, такие как шпонки, резиновые прокладки и соединительные блоки [16]. Поэтому он поделен на 3 группы: колонные, балочные и соединения с соединительными блоками. Данное разделение сделано по признаку того, какие элементы модулей задействуются в соединении.

3.4.1 Column-to-column bolted inter-module connections / Болтовые колонные межмодульные соединения

Наиболее распространенным типом болтовых межмодульных соединений являются соединения колонн, аналогичные классическим стыковым узлам для трубчатых сечений. Такие соединения чаще всего включают в себя фланцевые пластины колонн, которые затем стягиваются болтами [16].

Дополнительные пластины или направляющие штифты могут использоваться для усиления горизонтальной связи, что повышает жёсткость конструкции и её устойчивость к сдвиговым нагрузкам. В некоторых системах для этого используется промежуточная пластина, которая вставляется между торцевыми пластинами колонн, что улучшает сдвиговую жёсткость соединений и повышает их надёжность при воздействии динамических нагрузок, таких как землетрясения или сильные ветровые воздействия.

Колонные болтовые соединения могут выполняться как между смежными колоннами, так и между колоннами, расположенными друг над другом. Простые соединения, как правило, используют болты и различные типы пластин, такие как торцевые, накладные и ребристые пластины. Шарнирные соединения чаще всего выбирают, поскольку они требуют меньше усилий при изготовлении и монтаже. Для достижения необходимого уровня жесткости соединения

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

решающее значение имеет расположение болтов, сварных швов и дополнительных элементов. При этом болтовое соединение является более простым и дешевым вариантом, тогда как сварные соединения сложнее, дороже и требуют тщательного контроля качества [1].

Далее в хронологическом порядке приведен обзор разработанных на момент 2024 года колонных болтовых межмодульных соединений (C1-C8). Также краткая сводка по ним представлена в таблице 2.

В исследованиях [36] и [37] 2016 года рассматривается сразу два колонных межмодульных соединения: вертикальное (C1) и горизонтальное (C2). Вертикальное соединение реализовано через фланцевое болтовое соединение колонн, обеспечивая только вертикальную связь. Горизонтальное соединение выполняется из соединительных пластин, привариваемых к колоннам соседних модулей, и соединенных болтами, тем самым обеспечивая жесткость и устойчивость конструкции в горизонтальной плоскости. В совокупности эти соединения обеспечивают полную связность, необходимую жесткость и устойчивость модульной конструкции при вертикальных и горизонтальных нагрузках. Однако горизонтальное соединение сильно ограничено в использовании для внутренних соединений из-за сложности доступа для монтажа. Дополнительным недостатком является необходимость большого количества соединений, так как каждое из них обеспечивает связь только в одном направлении.

В исследовании [38] предложена технология болтового соединения (C3) для модульных стальных зданий, использующая накладную пластину для вертикального и горизонтального соединения. Для доступа к болтам в колоннах выполнены вырезы, что может вызывать нежелательные эффекты. Монтаж осуществляется с помощью крестообразной пластины и болтов, накладная пластина закрывает вырез. Соединение обладает удовлетворительной пластичностью и ограниченной жесткостью, что позволяет классифицировать его как полужесткое. Оно подходит для наружных и внутренних узлов, но требует значительных трудозатрат и внешний доступ для установки болтов. Соединение соответствует сейсмическим требованиям и может быть усилено для повышения жесткости на 18–25%. Образцы без усилений подвержены раннему разрушению сварных швов, тогда как усиленные выдерживают значительные моменты при высоких деформациях [39].

В исследовании [40] предложено межмодульное колонное соединение (C4) для трубчатых элементов из армированного волокнами полимера, включающее стальное болтовое фланцевое соединение и клеевое (адгезионное) сцепление стальной втулки с колонной. Клеевое соединение снижает концентрацию напряжений, а фланцевые болты обеспечивают пластичность за счет текучести стали. Эксперименты показали хрупкость клеевого соединения при осевой нагрузке, с остаточной прочностью 10–45 кН и оптимальной длиной шва 100 мм. Использование фланцевого соединения с восемью болтами увеличивает начальную жесткость конструкции на 225% и предельную прочность на 82% по сравнению с четырехболтовой конфигурацией. Однако склонность клеевого соединения к хрупкому разрушению требует тщательного проектирования.

Межмодульное соединение (C5) представляет собой конструкцию, в которой объединены болтовые крепления и направляющие штифты для улучшения конструктивных характеристик и поведения под нагрузкой [31]. Соединение состоит из торцевых пластин, предварительно приваренных к стальным колоннам модулей, соединённых между собой центральной соединительной пластиной посредством болтов и направляющих штифтов. В этой конструкции направляющие штифты играют ключевую роль, помогая точно позиционировать модули на месте и обеспечивая дополнительное боковое удержание до установки и натяжения болтов. После начального проскальзывания соединение переходит в несущий режим, где болты и направляющие штифты обеспечивают устойчивость к сдвиговым нагрузкам [41]. При этом болты стягивают модули вертикально, создавая потенциальные горизонтальные зазоры. Эти зазоры могут способствовать рассеиванию энергии и улучшать общую производительность здания [42]. Соединение возможно использовать для внутренних межмодульных узлов хотя для его установки требуется внешняя доступность, что может усложнять монтаж и нарушать отделку здания.

В статье [43] исследуется межмодульное соединение (C6) в двух вариантах. В одном варианте используются шайбы между соединительной и торцевыми пластинами колонн, создавая тем самым зазор между ними. В другом варианте между соединительной и торцевыми пластинами применяются резиновые прокладки. Оба соединения обладают способностью переносить как вертикальные, так и горизонтальные нагрузки, передаваемые между модулями, и предназначены для повышения устойчивости и энергоемкости конструкции при сейсмических нагрузках. Соединения с резиновыми слоями лучше поглощают энергию и уменьшают

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

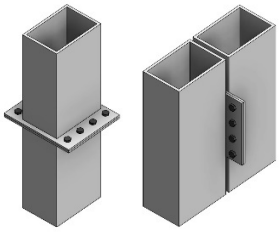
разрушение колонн. Преимущества включают в себя улучшенную пластичность, возможность смещения области повреждений в сторону соединения, а не колонн, а также высокую энергоемкость. Однако для монтажа данного соединения необходимо рабочее пространство. При увеличении количества упругих слоев и пластин соединение становится сложным для изготовления и монтажа.

Для оптимизации монтажа модульных конструкций было разработано болтовое межмодульное соединение (C7) [44], которое включает направляющую круглую трубу внутри полого сечения колонны и резьбовые болты для соединения торцевых и промежуточных пластин с соединительной пластиной. Торцевые пластины имеют встроенное резьбовое отверстие, что обеспечивает надежную вертикальную связь, а горизонтальная связь достигается через соединительную пластину. Приваренные диагональные ребра жесткости на балках и колоннах значительно повышают грузоподъемность и жесткость соединения, особенно при увеличении их размеров, предотвращая разрушение конструкции под значительными нагрузками. Преимуществом данного соединения является простота монтажа без повреждения внутренней отделки модулей, однако его прочность зависит от качества сварных швов и размеров ребер жесткости.

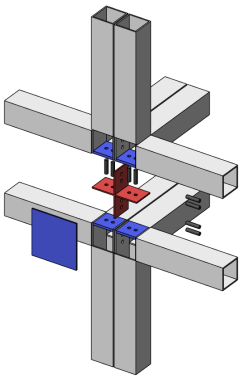
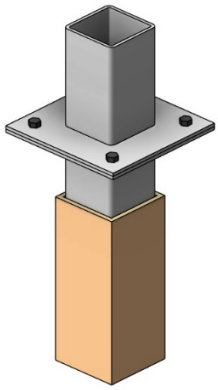
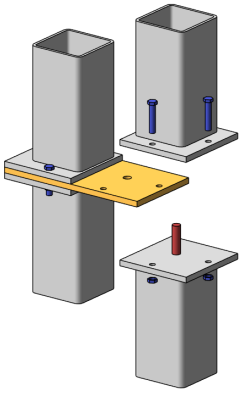
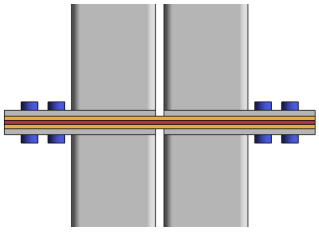
В работе [29] предлагаемое межмодульное соединение (C8) соединяет колонны соседних модулей одновременно по вертикали и горизонтали. Данное соединение является боковым. В нем используются удлиненные торцевые пластины, которые предварительно закрепляются на колоннах, что упрощает монтаж. Однако такая конструкция требует строгой последовательности разборки, что ограничивает гибкость при необходимости удаления промежуточных модулей. В исследовании особое внимание уделено поведению соединения под воздействием сдвиговых нагрузок. Было выявлено, что соединение склонно к проскальзыванию даже при небольших боковых нагрузках, что делает его особенно важным с точки зрения надёжности. Хотя конструкция способна передавать нагрузки в вертикальном и горизонтальном направлениях, использование отверстий для болтов может привести к накоплению проскальзываний и развитию деформаций. Такие соединения нуждаются в дополнительном усилении, особенно в сейсмически активных зонах, где нагрузки могут быть значительными.

Исследуемое в [45] межмодульное соединение (C9) состоит из вставного элемента и соединительной пластины. Вертикальная связь обеспечивается крестообразным элементом, вставляемым в колонну верхнего модуля, который предотвращает вертикальные перемещения и надежно фиксируется к торцевой пластине колонны нижнего модуля высокопрочными болтами. Горизонтальная связь осуществляется через соединительную пластину с квадратными отверстиями, через которые проходят крестообразные элементы, соединяющие колонны соседних модулей. Преимуществом этого соединения является снижение количества монтажных отверстий и возможность быстрого монтажа благодаря заранее установленным компонентам. Также соединение демонстрирует повышенную устойчивость к прогрессирующему обрушению. Однако возможное проскальзывание в соединении крестообразного элемента с профилем колонны из-за производственных допусков представляет собой потенциальный недостаток.

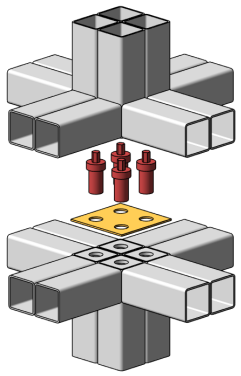
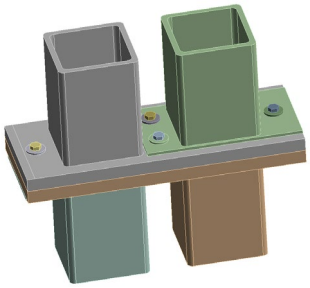
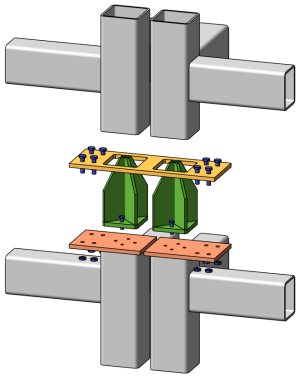
Таблица 2. Болтовые колонные межмодульные соединения
Table 2. Column-to-column bolted inter-module connections

№	Тип по месту и направ-лению связи	Основные соединяющие элементы	Иллюстрация [Источник]	Ключевые особенности
C1 C2	Угловое, боковое - VC+HC	1) Фланцевые пластины 2) Болты	 [36], [37]	- Вертикальная и горизонтальная связи обеспечиваются отдельными соединениями; - Необходимость большого количества соединений.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

C3	Боковое - VH	1) Крестообразная фасонка 2) Накладная пластина 3) Болты	 [38], [39]	- Горизонтальная и вертикальная связи обеспечиваются болтовым соединенем с фасонкой; - Накладная сварная пластина закрывает вырезы и обеспечивает дополнительную жесткость; - Требует значительных трудозатрат и доступа для установки болтов.
C4	Угловое - VC	1) Фланцевые пластины 2) Болты 3) Стальные полые секции 4) Адгезионный контакт	 [40]	- Соединение для стеклопластиковых колонн; - Вертикальная связь обеспечивается фланцевым соединением и адгезионным сцеплением колонны со стальными полыми секциями; - Оптимальная длина клеевого шва – 100 мм; - Высокая жесткость и прочность; - Хрупкость клеевого состава требует тщательного расчета и проектирования.
C5	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Торцевые пластины 2) Соединительная пластина 3) Фиксирующий штифт 4) Болты	 [31], [41], [42]	- Вертикальная связь обеспечивается болтовым соединением торцевых пластин колонн; - Горизонтальная связь обеспечивается соединительной пластиной; - Модули выравниваются во время монтажа за счет фиксирующего штифта; - Соединение устойчиво к сдвиговым нагрузкам; - Не совместимо с полной отделкой модулей.
C6	Боковое - VH	1) Торцевые пластины 2) Соединительная пластина 3) Болты 4) Шайбы / Резиновые прокладки	 [43]	- 2 варианта: с упругими слоями из резины и без них; - Вертикальная связь обеспечивается болтами; - Горизонтальная связь обеспечивается соединительной пластиной; - Соединения разборные и экономичные; - Эффективны под динамическими нагрузками; - Обеспечивают повышенную пластичность и энергоемкость; - Подходят для модульных зданий высотой до 8 этажей.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

C7	Боковое, внутреннее - VH	1) Торцевые пластины 2) Соедини-тельная пластина 3) Болты	 [44]	- Вертикальная связь обеспечивается болтовым соединением торцевых пластин колонн; - Горизонтальная связь достигается через соединительную пластину; - Соединение без ребер жесткости ведет себя как полужесткое, усиленное является жестким; - Удобный монтаж без нарушения отделки модулей.
C8	Боковое - VH	1) Соедини-тельные (сдвиговые) пластины 2) Торцевые пластины 3) Болты	 [29]	- Вертикальная связь обеспечивается соединением торцевых пластин; - Горизонтальная связь обеспечивается соединительными пластинами; - Склонность к проскальзыванию под сдвиговыми нагрузками; - Необходимость усиления конструкции в сейсмически активных зонах.
C9	Боковое - VH	1) Торцевые пластины 2) Соедини-тельная пластина 3) Вставной крестообраз-ный элемент 4) Болты	 [45]	- Вставной элемент обеспечивает вертикальную связь; - Соединительная пластина обеспечивает горизонтальную связь; - Простота и скорость монтажа; - Высокая устойчивость к прогрессирующему обрушению; - Возможно вертикальное проскальзывание после циклических нагрузок из-за допусков.

3.4.2 Beam-to-beam bolted inter-module connections / Болтовые балочные межмодульные соединения

Болтовые балочные соединения являются одним из распространенных типов межмодульных узлов, при которых стыковка осуществляется не через колонны, а между балками перекрытий верхнего и нижнего модулей. В таких соединениях обычно используются фасонки различных геометрий, спроектированные для плотного заполнения зазоров между модулями и минимизации неиспользуемого пространства между кассетами пола и потолка. [16]

Горизонтальная связь обычно осуществляется с использованием фасонок, крестообразных пластин или болтовых креплений, тогда как вертикальная связь достигается за счёт длинных болтов, фиксирующих балки между модулями. Преимуществом таких соединений является их высокая скорость монтажа и надёжность. Например, использование фасонок и шпонок позволяет эффективно передавать нагрузки между модулями, что улучшает их устойчивость к боковым и сейсмическим воздействиям. Ещё одной проблемой является возможное ослабление сечения колонн из-за необходимости прорезания отверстий для болтов, а также концентрация напряжений в местах креплений, что требует оптимизации конструкции.

Как отмечают многие исследователи, данные соединения обладают высокой прочностью и могут быть рассчитаны на восприятие сейсмических нагрузок. Однако болтовые балочные узлы накладывают строгие требования на допуски изготовления и монтаж. Установка большого

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

количества болтов может представлять трудности, особенно при необходимости создания доступа для монтажа внутри готовых модулей. Это требует проделывания отверстий в стенах, полу или потолке, что может повредить внутреннюю отделку и привести к дорогостоящим переделкам. В условиях, когда предъявляются строгие требования к завершению отделки на 100%, как, например, в Сингапуре, такой тип соединения может оказаться не самым удобным вариантом для модульных стальных конструкций [46].

Помимо этого, балочные соединения часто предусматривают наличие зазора между потолком и полом для обеспечения доступа к межмодульным узлам и прокладки инженерных сетей, что может потребовать дополнительного пространства и усложнить конструкцию. В то же время некоторые типы соединений, использующие шпонки для улучшения выравнивания модулей, помогают ускорить процесс монтажа. Однако сварные швы внутри модуля, соединяющие балку и колонну, подвержены риску разрушения при сейсмических воздействиях, что снижает их долговечность в условиях повышенных нагрузок.

Далее в хронологическом порядке приведен обзор разработанных на момент 2024 года балочных болтовых межмодульных соединений (B1-B13). Также краткая сводка по ним представлена в таблице 3.

В работах [30] и [47] межмодульное соединение (B1) для стальных модульных конструкций включает квадратные полые колонны с торцевыми пластинами и стальные балки, соединяемые болтами и соединительной пластиной. Наличие в перечисленных элементах болтовых отверстий упрощает монтаж, поскольку позволяет избежать дополнительной сварки на строительной площадке. Такая конструкция обеспечивает горизонтальное и вертикальное соединение, что улучшает распределение нагрузок и упрощает сборку. Преимущества соединения включают ускоренное выполнение монтажа и высокую пластичность после достижения текучести. Однако для доступа к установке болтов в колоннах необходимы отверстия, что приводит к ослаблению сечения колонн. Вдобавок можно отметить необходимость точного контроля деформаций и подверженность разрушению сварных швов при статических и циклических нагрузках. Прочность модульных конструкций с такими соединениями и более чем 3-мя этажами может быть ниже, чем традиционные стальные конструкции. Также возможны неравномерные деформации и снижение жесткости системы из-за зазоров в соединениях.

В межмодульном соединении [48] (B2) применяется крестовидная стальная пластина, устанавливаемая на стыке колонн. Эта пластина соединяется с балками посредством болтов, что обеспечивает надежное горизонтальное соединение между модулями. Конструктивно, пластина образует зазор между колоннами, что упрощает процесс монтажа и обеспечивает эффективную горизонтальную связь. Однако, такое соединение не обеспечивает вертикальную связь между модулями, а также не совместимо с готовой внутренней отделкой модулей.

Исследуемое в [49] межмодульное соединение (B3) включает длинные болты, соединяющие вертикально балки пола верхних модулей с потолочными балками нижних модулей. Горизонтальная связь между модулями осуществляется через фасонку, к которой могут быть приварены шпонки для сопротивления сдвигу. Данное соединение обеспечивает легкость доступа для осмотра, повышенную безопасность работы и архитектурную гибкость. Недостатки включают возможные проблемы с проникновением воды через монтажные отверстия и потенциальную необходимость доработки соединений на месте. Для улучшения несущей способности можно добавить дополнительный ряд болтов, однако возможна концентрация напряжений, требующая оптимизации конструкции.

Межмодульное соединение (B4) для стальных модульных зданий, исследуемое в работах [50] и [51], состоит из двух ключевых компонентов: вертикальных болтовых соединений и вставного элемента для горизонтальной связи. Для предотвращения локального прогиба балки усиливаются накладными пластинами, привариваемыми на заводе. Вставной элемент имеет четыре квадратные трубы, тем самым обеспечивает горизонтальное соединение четырех колонн смежных модулей в угловом узле и также выравнивание модулей во время сборки, что упрощает монтаж. Соединение демонстрирует высокую энергоемкость и деформационную способность, улучшенную устойчивость к боковым нагрузкам и дополнительное сопротивление сдвигу. Однако такое соединение плохо совместимо с внутренней отделкой и подходит лишь для несущих компонентов модуля, что ограничивает его применение [38].

Ключевым элементом межмодульного болтового соединения (B5) [52] является крестообразная фасонка с приваренными квадратными шпонками. Эти шпонки, представляющие собой полные элементы, вставляются внутрь колонн модулей, обеспечивая эффективную

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

передачу горизонтальных нагрузок, а также повышенное сопротивление сдвигу. Важной особенностью является их роль в выравнивании модулей во время сборки. Фасонка также служит для соединения балок посредством болтов, что позволяет обеспечивать как вертикальные, так и горизонтальные связи между модулями. Испытания продемонстрировали, что увеличение глубины шпонок с 100 до 360 мм приводит к повышению предельной нагрузки на 11.2–12.1%, а увеличение их толщины с 10 до 36 мм — на 7.5–9.7%. Однако существенным недостатком конструкции является необходимость выреза в балках для установки фасонки, что может ослабить сечение балки и повлиять на общую устойчивость соединения.

В работах [53–55] исследовано межмодульное соединение (B6), использующее болты и соединительный пластинчатый элемент с вертикальными и горизонтальными пластинами. Они обеспечивают как вертикальную, так и горизонтальную связь. Соединительный пластинчатый элемент представлен в трех видах для углового, бокового и внутреннего соединений. Соединение демонстрирует способность сохранять более 80% пластического момента при угле наклона до 0.04 радиан, что подтверждает его эффективность при сейсмических нагрузках. Увеличение толщины пластин улучшает начальную жесткость и изгибающую прочность соединения. Сборка осуществляется с помощью высокопрочных болтов и не требует доступа для установки. Однако, сборка может быть усложнена из-за необходимости точного соответствия проектным требованиям.

В работе [56] предложено межмодульное соединение (B7), которое представляет собой болтовое соединение с применением накладной пластины для боковых узлов стальных модульных зданий. Вертикальная и горизонтальная связь модулей обеспечивается за счет использования внешней стальной пластины с системами болтов, включая обычные и слепые болты. Слепые болты применяются для соединения с полыми стальными колоннами, что упрощает монтаж, в то время как обычные высокопрочные болты используются для соединения с балками С-образного сечения. Испытания показали, что слепые болты не выходят из строя до разрушения других элементов конструкции. Применение распорных связей увеличивает жесткость соединения в 2 раза и его прочность на 60%. Основным недостатком является ограничение в использовании для внутренних узлов, что может снижать эстетические требования.

В межмодульном соединении (B8) [57] используется фасонка для горизонтальной связи, а также длинные болты, соединяющие балки, и вставной элемент со шпонками для вертикальной связи. Шпонки вставляются в полые секции колонн, обеспечивая надежное соединение модулей. Фасонка, расположенная между модулями, имеет отверстия для шпонок и создает регулируемый зазор между балками для доступа. Преимущества конструкции включают высокую способность к рассеиванию энергии, пластичное поведение и устойчивость к циклическим нагрузкам. Недостатки заключаются в возможном осевом смещении между верхними и нижними модулями, что приводит к избыточным напряжениям и снижению несущей способности при глубине шпонок свыше 200 мм.

В 2021 году было предложено межмодульное соединение (B9), сочетающее использование полого вставного компонента для соединения квадратных стальных колонн и применение сдвоенных швеллерных балок. Вертикальная связь обеспечивается заводской приваркой балок к колоннам через торцевые пластины, а горизонтальная осуществляется болтовым креплением через накладные пластины и вставной элемент. Данная конструкция демонстрирует высокую жесткость и несущую способность, а также позволяет избежать сварочных работ на месте и ускорить монтаж. Однако зазоры до 2 мм могут снижать эффективность соединения под нагрузкой [58]. Дальнейшие исследования показали, что добавление сдвиговых болтов по длине балок повышает предельную нагрузку на 84% и начальную жесткость на 122%, но требует точного контроля зазоров и напряжений [59]. При этом соединение подвержено локальной потере устойчивости на концах балок при боковых нагрузках, а его сложная конструкция требует точного проектирования для предотвращения концентрации напряжений [60]. Кроме того, увеличение размеров потолочных балок и применение болтовых соединений улучшают сейсмостойкость модульных конструкций, однако значительное скольжение между балками может приводить к пластическим деформациям и снижению несущей способности при боковых нагрузках [61].

Межмодульное соединение (B10) представляет собой стыковое соединение, состоящее из соединительных пластин и высокопрочных болтов, обеспечивающих надежную передачу вертикальных и горизонтальных нагрузок. Болты предотвращают сдвиг и способствуют прочному сцеплению модулей, а пластины соединяют балки и колонны, исключая необходимость сварки на месте и ускоряя монтаж [62]. Соединение сохраняет несущую способность даже при снижении

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

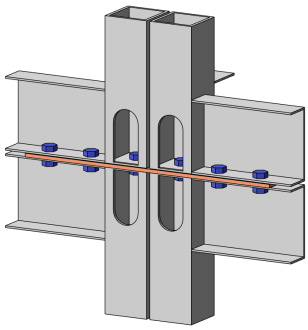
преднатяжения болтов, оставаясь полужестким. Поведение соединения при деформациях свыше 40 мм характеризуется значительным резервом несущей способности [63]. Основными механизмами разрушения являются изгибный прогиб балки и локальная потеря устойчивости полки, особенно под воздействием сейсмических нагрузок [64]. Усиление фланцевых зон балки повышает энергоемкость соединения на 82.6% при незначительном увеличении расхода стали [65]. В целом, соединение демонстрирует высокую прочность, устойчивость к циклическим нагрузкам и может быть рекомендовано для применения в регионах с высокой сейсмической активностью.

В исследовании [13] предложено межмодульное соединение (B11) с крестовидным вставным компонентом для горизонтальной связи и накладными пластинами для фиксации модулей и распределения нагрузок. Болтовое крепление балок обеспечивает вертикальную связь и жесткость. Соединение отличается высокой скоростью сборки и простотой монтажа, а модификация с диагональными связями повышает его сейсмическую устойчивость, обеспечивая его применимость в зонах с высокой сейсмической активностью. Недостатками являются сложность демонтажа и ограниченная применимость во внутренних узлах из-за необходимости рабочего пространства для установки болтов.

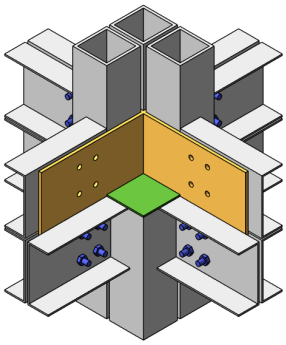
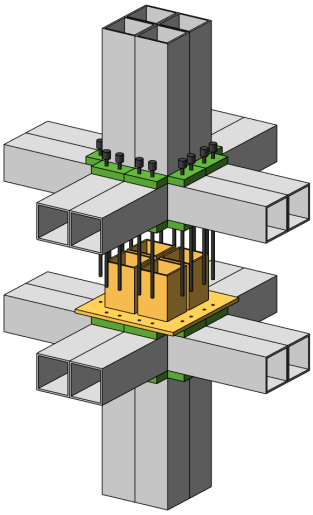
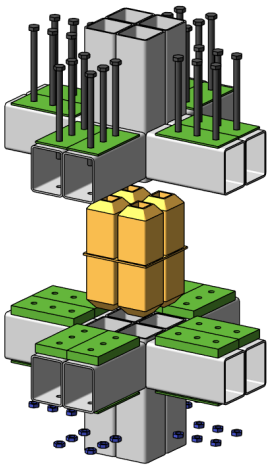
Межмодульное соединение (B12) [66], [67] состоит из верхнего и нижнего адаптеров, фасонки и промежуточных пластин, плоской пружины и фиксирующего штифта, обеспечивая самозапирающийся механизм для крепления колонн без необходимости сварки или дополнительного пространства между модулями. Соединение передает горизонтальные и вертикальные нагрузки, а также изгибающие моменты через болты и штифты, что обеспечивает надежную связь между модулями. Соединение сохраняет 80% несущей способности при угле деформации 0.04 радиана, позволяя классифицировать его как полужесткое (согласно Eurocode 3). Увеличение толщины балок и натяжения болтов повышает несущую способность и жесткость соединения, при этом пружина и внешние болты эффективно предотвращают смещение колонн под осевыми нагрузками. Однако соединение требует точной установки, а сложная взаимосвязь компонентов может затруднить демонтаж.

В патенте [68] предложено межмодульное соединение (B13), которое использует фасонку и фиксирующий штифт для горизонтальной связи. Длинные болты обеспечивают вертикальную связь. Штифт обеспечивает сцепление и выравнивание модулей при монтаже. Соединение отличается высокой жесткостью, но подвержено концентрации напряжений. Его преимуществом является компактность, исключающая необходимость дополнительного монтажного пространства, однако точная подгонка и сложный демонтаж затрудняют использование.

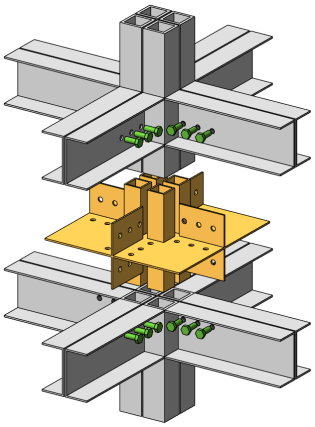
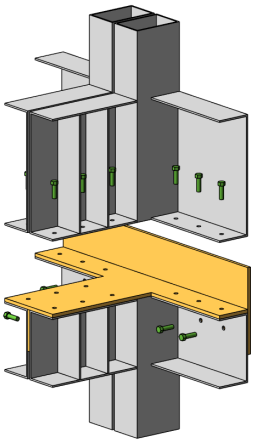
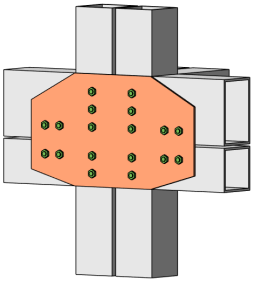
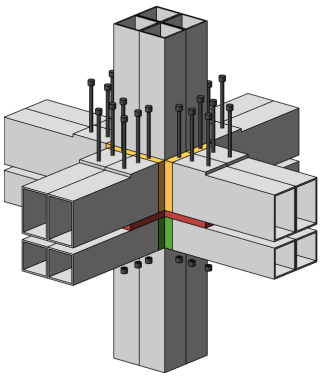
Таблица 3. Болтовые балочные межмодульные соединения
Table 3. Beam-to-beam bolted inter-module connections

№	Тип по месту и направ-лению связи	Основные соединяющие элементы	Иллюстрация [Источник]	Ключевые особенности
B1	Боковое - VH	1) Фасонка 2) Торцевые пластины 3) Болты	 [30], [47]	- Горизонтальная связь и жесткость обеспечивается фасонкой; - Вертикальная связь обеспечивается болтовым соединением балок и торцевых пластин колонн; - Наличие отверстий для доступа к болтам требует локального усиления; - Не подходит для зданий выше трех этажей.

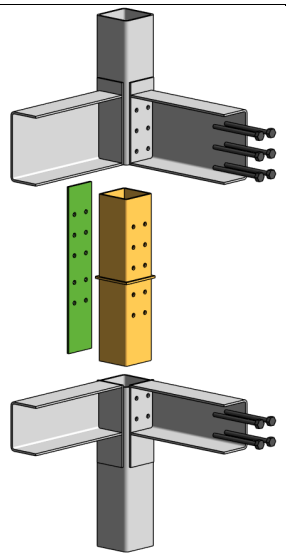
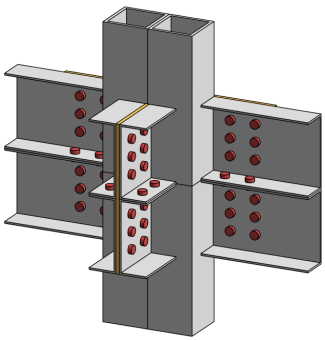
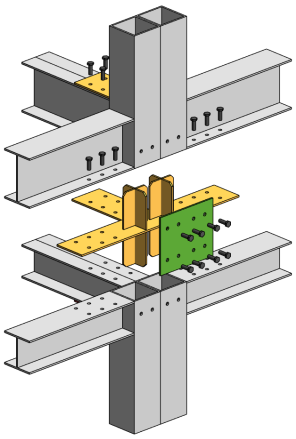
This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

B2	Внутреннее - НС	1) Крестовидная фасонка 2) Болты	 [48]	- Вертикальная связь не обеспечивается; - Горизонтальная связь обеспечивается за счет болтового крепления фасонки к балкам; - Не совместимо с готовой внутренней отделкой модулей; - Облегченный монтаж за счет фасонки; - Возможно ослабление соединения при недостаточной глубине врезки.
B3	Боковое, внутреннее - VH	1) Вставной элемент с фасонкой и шпонками	 [49]	- Вертикальная связь обеспечивается длинными болтами; - Горизонтальная связь обеспечивается фасонкой; - Шпонки обеспечивают сопротивление сдвигу; - Легкий доступ для осмотра и обеспечения безопасности при монтаже; - Вертикальная несущая способность может быть усилена добавлением дополнительных болтов.
B4	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Вставной элемент 2) Накладные пластины 3) Длинные болты	 [50], [51]	- Горизонтальная связь обеспечивается вставным элементом; - Вертикальная связь обеспечивается болтами; - Балки в месте болтового соединения усилены накладными пластинами; - Высокая деформационная способность, устойчивость к боковым нагрузкам; - Монтаж соединения нарушает внутреннюю отделку модулей; - Требуется доступ для установки болтов.

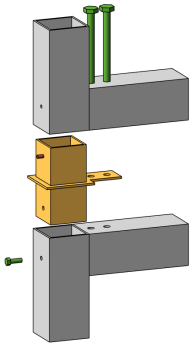
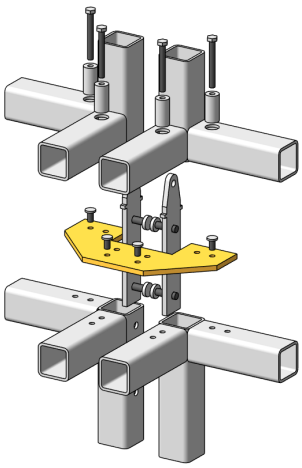
This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

B5	Внутреннее - VH	1) Вставной элемент: 1.1) Крестообразная фасонка 1.2) Шпонки 2) Болты	 [52]	- Шпонки обеспечивают передачу горизонтальных нагрузок и сопротивление сдвигу; - Фасонка и болты соединяют балки, обеспечивая вертикальную и горизонтальную связь; - Необходимость выреза в балках для установки фасонки ослабляет сечение; - Шпонки способствуют выравниванию модулей при монтаже.
B6	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Вставной пластинчатый элемент 2) Болты	 [53], [54], [55]	- Вертикальная связь обеспечивается болтовым соединением; - Горизонтальная связь обеспечивается вставным пластинчатым элементом; - Увеличение толщины пластинчатого элемента увеличивает жесткость соединения; - Поглощение энергии выше, чем у сварных соединений; - Простая сборка; - Высокая устойчивость к циклическим нагрузкам.
B7	Боковое - VH	1) Накладные пластины 2) Слепые болты (для соединения полых колонн) 3) Обычные болты (для соединения балок)	 [56]	- Вертикальная и горизонтальная связи обеспечиваются накладной пластиной; - Соединение является жестким и обеспечивает прочность до сдвига на 7%; - Слепые болты не выходят из строя до разрушения других элементов модуля.
B8	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Фасонка; 2) Вставной элемент со шпонками; 3) Длинные болты	 [57]	- Горизонтальная связь обеспечивается фасонкой; - Вертикальная связь обеспечивается длинными болтами и вставным элементом со шпонками; - Зазор, создаваемый фасонкой можно регулировать; - Высокая способность, пластичность и устойчивость к циклическим нагрузкам; - Возможно осевое смещение и снижение несущей способности при длине шпонок больше 200 мм.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

B9	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Полный вставной элемент с фасонкой 2) Накладные пластины 3) Длинные болты 4) Стандартные болты (для соединения балок)	 [58], [59], [60], [61]	- Вертикальная связь обеспечивается через накладные пластины и болты; - Горизонтальная связь обеспечивается вставным полым элементом и длинными болтами; - Балки соединяются болтами, улучшая сопротивление модулей изгибу; - Соединение является полужестким; - Требуется доступ для установки болтов.
B10	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Соедини-тельные пластины 2) Болты	 [62], [63], [64], [65]	- Вертикальная связь обеспечивается болтовым соединением балок; - Горизонтальная связь обеспечивается болтовым соединением балок и соединительных пластин; - Быстрая установка; - Удовлетворительная пластичность; - Высокая сейсмостойкость; - Возможны локальные зазоры при больших деформациях; - Необходим тщательный контроль начальных деформаций; - Возможно усиление диагональными связями и пластинами.
B11	Угловое, боковое, внутреннее VH	1) Вставной элемент с фасонкой и крестовидными шпонками 2) Накладные пластины 3) Болты	 [13]	- Вертикальная связь реализуется болтовыми соединениями; - Горизонтальная связь обеспечивается вставным элементом и накладными пластинами; - Диагональные связи повышают сейсмостойкость; - Стабильное поведение при циклических нагрузках; - Необходимость рабочего пространства для установки болтов; - Сложность демонтажа.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

B12	Угловое, боковое, внутреннее VH	1) Адаптеры 2) Соедини-тельная пластина 3) Пружина 4) Фиксирующий штифт	 [66], [67]	- Вертикальная и горизонтальная связи обеспечиваются через болты и штифты; - Самозапирающийся механизм упрощает монтаж; - Две вариации: с болтами и штифтами, болты эффективнее против сдвига; - Выдерживает 80% предельного момента при угле 0.04 радиана.
B13	Угловое, боковое, внутреннее VH	1) Фасонка 2) Накладные пластины 3) Направляю-щий штифт 4) Длинные болты	 [68]	- Вертикальная связь достигается за счет болтового соединения балок; - Горизонтальная связь обеспечивается накладной пластиной, фасонкой и направляющим штифтом; - Направляющий штифт обеспечивает выравнивание модулей при монтаже; - Накладные пластины имеют отверстия для крепления балок модулей болтами; - Упрощенный монтаж; - Сложность демонтажа из-за множества соединительных элементов.

3.4.3 Bolted inter-module connections with connection blocks / Болтовые межмодульные соединения с соединительными блоками

Болтовые межмодульные соединения с соединительными блоками представляют собой одну из наиболее эффективных систем для сборки модульных зданий [16]. Основное отличие этих соединений заключается в том, что они скрепляют специальные соединительные блоки, которые являются частью конструкции модулей и располагаются на углах, соединяя колонны с балками. В каком-то смысле сами соединительные блоки являются одновременно и внутримодульными соединениями. Они обеспечивают надежную фиксацию преимущественно за счет болтов. Соединительные блоки бывают разных форм и дизайнов: от классических до более сложных литых стальных деталей.

Главное преимущество таких узлов заключается в их простоте и надежности монтажа, особенно когда требуется быстрая и эффективная сборка с минимальным количеством дополнительного оборудования. Тем не менее, соединительные блоки и соединяющие их элементы зачастую обладают сложной конструкцией и разрабатываются с учетом специфики технологических процессов предприятий, занимающихся производством объемных модулей [6].

Болтовые соединения с соединительными блоками не во всех работах отнесены в отдельную категорию. Например, в работе [27] их относят в одну категорию с самозапирающимися соединениями. Также стоит отметить отсутствие общепринятой терминологии в отношении соединительных блоков. В литературе встречается несколько вариантов их названий, самыми частыми из которых являются «коннектор» (connector) и «крепежный элемент» (fitting). Было решено назвать их соединительными блоками, так как они, как правило, имеют коробчатый вид и непосредственно участвуют в соединении модулей. Термин «коннектор» больше подходит именно для соединяющего промежуточного элемента. В таком значении он тоже используется в исследуемой литературе и будет употребляться далее в данной работе.

Далее в хронологическом порядке приведен обзор разработанных на момент 2024 года болтовых межмодульных соединений с соединительными блоками (F1-F10). Также краткая сводка по ним представлена в таблице 4.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Межмодульное соединение (F1) имеет соединительные блоки в виде стального кубического кронштейна [8], [18] с болтовым креплением, обеспечивающим горизонтальную и вертикальную связь между модулями. Пластины с вырезами под болты и направляющие штыри позволяют точно позиционировать модули. При испытаниях соединение показало пластичный характер разрушения болтов под воздействием растягивающих нагрузок, без разрушения кронштейна, то способствует повышению сейсмостойкости конструкции. Средняя несущая способность на сдвиг составила 416.5 кН. Кубические соединительные блоки можно наращивать, соединяя несколько модулей, что повышает количество структурных элементов и общую прочность системы.

Межмодульное соединение (F2) включает в себя угловые крепежи, соединяющие балки и колонны модуля, поворотные замки (twist lock) для вертикального соединения крепежей и длинные болты для горизонтального соединения крепежей [69]. Данные соединения реализуются через крестовидную фасонку. Основное преимущество данного соединения заключается в полной предварительной сборке и простом монтаже. В то же время отсутствуют механические исследования ее прочностных характеристик, что ограничивает её применение в сейсмических районах и высоких зданиях. Также это соединение не подходит для внутренних узлов из-за отсутствия рабочего пространства для монтажа.

Соединение VectorBloc (F3) включает в себя верхний и нижний блоки, регистрационный штифт, винты с плоской головкой, высокопрочные винты с цилиндрической головкой и фасонку [70], [71]. Горизонтальная связь между модулями осуществляется с помощью фасонки, которая крепится к верхнему блоку при помощи винтов с плоской головкой, в то время как вертикальная связь обеспечивается двумя винтами с цилиндрической головкой. Фиксирующий штифт играет ключевую роль в выравнивании модуля, облегчая его точное позиционирование. Эта система соединений способствует упрощению и ускорению процесса сборки модульных зданий, а также обеспечивает надежность крепления. Тем не менее имеется склонность к хрупкому разрушению при растяжении, обусловленному разрывом винтов с внутренним шестигранником, и необходимость улучшения конструкции для обеспечения вязкого разрушения. Система ограничена применима только для модульных конструкций с полыми стальными элементами.

Межмодульное соединение (F4) представляет собой демпферную систему с использованием резины, установленную между соединительными блоками верхнего и нижнего модулей [6]. Соединение включает три основных компонента: верхнюю и нижнюю уплотнительные пластины, а также промежуточный изолирующий слой. Изоляционный слой состоит из чередующихся тонких стальных пластин и резиновых мембранных пластин, соединенных методом вулканизации. Соединение может быть выполнено через болтовое соединение угловых блоков модулей. Данное соединение обеспечивает деформационную устойчивость и стабильность конструкции в сейсмических условиях. Недостатки могут заключаться в сложности установки и возможной недолговечности резиновых компонентов под длительными нагрузками.

Компания Verbus Systems Limited разработала и запатентовала усовершенствованную систему соединений для строительных модулей. Межмодульное соединение (F5) данной системы исследуется в работах [25] и [72]. Оно обеспечивает большую гибкость в конфигурации и планировке модулей, а также более низкие затраты на производство и эксплуатацию. Основные компоненты системы включают угловые соединительные блоки, соединяемые болтами для вертикальных соединений, а также фасонка и шпонки для горизонтальной связи. Система позволяет строить высокие здания и обеспечивает точное выравнивание модулей. Недостатками являются повышенные затраты на материалы и сложность изготовления компонентов, а также необходимость точной установки первых модулей.

Исследуемое в [73] соединение (F6) состоит из трех ключевых компонентов: верхнего блока, нижнего блока и фасонки с фиксирующим штифтом. Они соединяются вертикально с помощью болтов, формируя цельное конструктивное решение. Использование фасонки между соединительными блоками, а также горизонтальных болтов для соединения смежных модулей, способствует улучшению прочностных характеристик. Добавление ребер и увеличение высоты балки значительно повышают механическую прочность соединения. Данное соединение отличается простой установкой и высокой совместимостью с требованиями угловых соединений. Тем не менее, его недостатки включают необходимость создания отверстий для доступа к болтам и возможные ограничения при сложных условиях.

Соединение (F7), разработанное [74], состоит из верхнего и нижнего блока, которые соединяются с помощью длинных вертикальных болтов. Оно довольно похоже по конфигурации на соединение VectorBloc. Основной конструктивной особенностью является замена внутренних

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

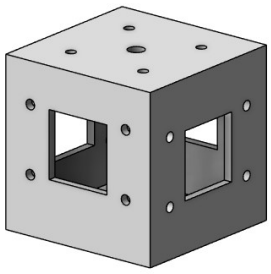
резьбовых отверстий на приваренные гайки, а также использование полых круглых элементов для усиления болтов, что обеспечивает надежное затягивание соединения. Это соединение демонстрирует улучшенные структурные характеристики по сравнению с традиционными методами благодаря усиленному сварному соединению и уменьшению размеров элементов, что способствует экономии затрат. Однако, несмотря на эти преимущества, необходимы дополнительные испытания для окончательной проверки надежности и эффективности данного соединения, особенно в сложных условиях на строительной площадке.

Исследуемое [75] межмодульное соединение (F8) представляет собой гибридное соединение, основными элементами которого являются соединительные блоки, болт из сплава с памятью формы и высокодемпфирующего резинового сердечника. Резиновый сердечник размещен между угловыми элементами модулей и служит для передачи вертикальных нагрузок и демпфирования поперечных смещений. Болт из сплава с памятью формы обеспечивает сопротивление напряжению на растяжение и возвращает форму после значительных деформаций. Соединение улучшает распределение энергии и предотвращает образование пластических деформаций в узлах. Основные преимущества включают высокую пластичность, энергоемкость и возможность многократного использования модулей. Недостатками являются высокая стоимость изготовления болтов из сплава с памятью формы и сложность проектирования соединения для каждого уровня здания.

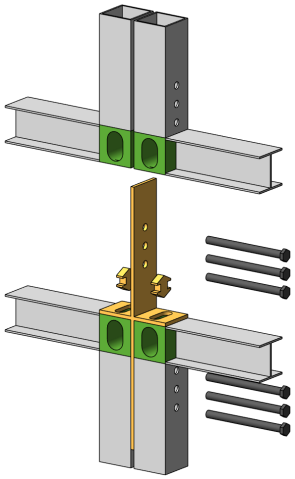
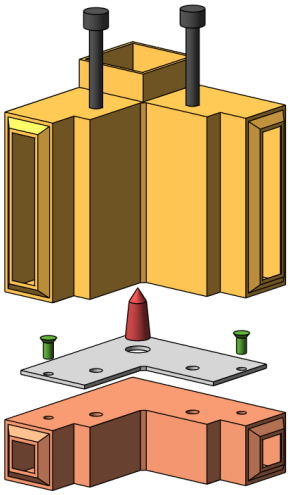
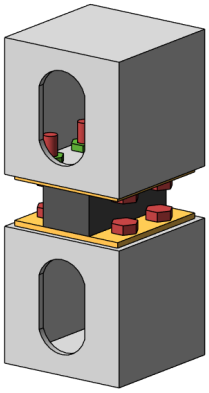
В статье [76] описано межмодульное соединение (F9), включающее как вертикальные, так и горизонтальные компоненты, предназначенные для соединения модульных элементов в высотных зданиях. Вертикальная связь осуществляется с помощью высокопрочных болтов, замковых гаек и прокладок, обеспечивающих передачу сжимающих сил через прямое контактное взаимодействие колонн и сопротивление растягивающим силам. Горизонтальная связь достигается с помощью стальной соединительной пластины, ключей и болтов, что обеспечивает передачу сил сдвига и осевых нагрузок между соседними модулями. Эти соединения демонстрируют способность к надежной передаче нагрузок, однако могут возникать проблемы с концентрацией напряжений.

Межмодульное соединение (F10) с коническими головками болтов разработано в [77] для решения проблем традиционных соединений в модульных стальных зданиях. Соединение включает конический болт, гайки со внутренней и внешней резьбой, фасонку, направляющие штыри и соединительные блоки. Оно обеспечивает точное вертикальное и горизонтальное выравнивание модулей благодаря направляющим штырям и фасонке. Основные преимущества этой системы включают ее заводское изготовление, что снижает необходимость в сварке на месте и повышает эффективность строительства, а также совместимость с различными сечениями балок и простота монтажа. Сейсмические испытания показали высокую стойкость соединения, высокую энергоемкость и минимальную зависимость от зазоров между балками.

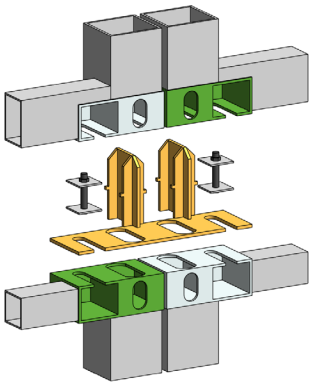
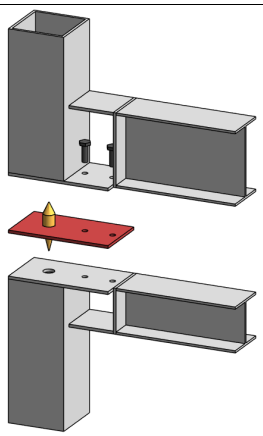
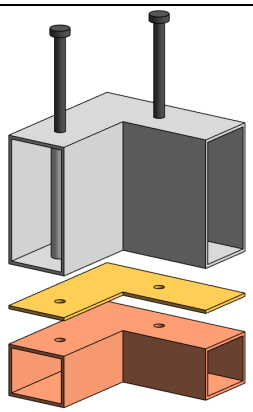
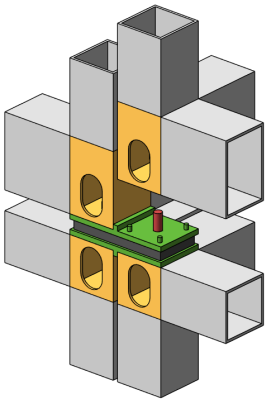
Таблица 4. Болтовые межмодульные соединения с соединительными блоками
Table 4. Bolted inter-module connections with connection blocks

№	Тип по месту соединения и направ-лению связи	Основные соединяющие элементы	Иллюстрация [Источник]	Ключевые особенности
F1	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Кубические кронштейны 2) Фасонка с отверстиями для болтов 3) Болты M22	 [8]	- Вертикальная и горизонтальная связь обеспечена болтовым соединением кронштейнов через фасонку; - Пластичное поведение и повышенная сейсмостойкость; - Ограниченная несущая способность; - Требуется дальнейшая оптимизация.

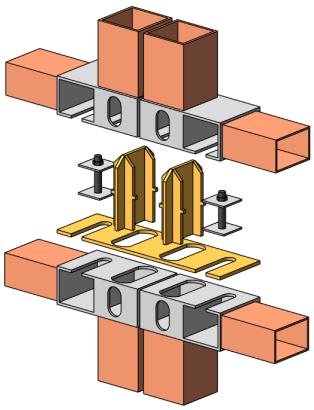
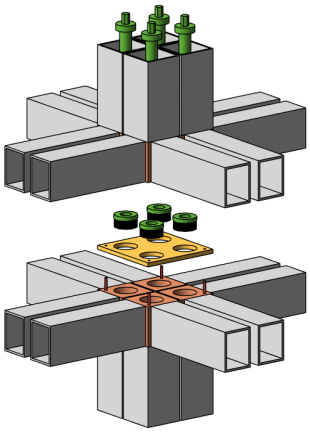
This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

F2	Боковое - VH	1) Соединительные блоки 2) Крестовидная фасонка 3) Поворотные замки 4) Длинные болты	 [69]	- Поворотные крепежи соединяют вертикально; - Болты и фасонка соединяют горизонтально; - Не подходит для внутренних узлов из-за отсутствия рабочего пространства; - Требуются механические исследования прочностных характеристик.
F3	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Верхний блок 2) Нижний блок 3) Фасонка 4) Фиксирующий штифт; 5) Винты с плоской головкой; 6) Винты с цилиндрической головкой	 [70], [71]	- Вертикальное соединение обеспечивается винтами с цилиндрической головкой; - Горизонтальное соединение обеспечивается фасонкой и винтами с плоской головкой; - Фиксирующий штифт используется для выравнивания модулей при монтаже и сопротивления сдвигу; - Возможно усиление привариваемыми пластинами; - Возможно использовать только с модулями из полых стальных элементов.
F4	Угловое - VC	1) Соединительные блоки 2) Уплотнительные пластины 3) Резиново-стальной элемент 4) Болты	 [6]	- Соединение обеспечивается через болты и промежуточный элемент; - Промежуточный элемент состоит из стальных и резиновых пластин; - Подходит для зданий в сейсмических районах.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

F5	Боковое - VH	1) Соедини-тельные блоки 2) Фасонка 3) Болты 4) Вставные элементы	 [25], [72]	- Вертикальная связь обеспечивается болтами; - Горизонтальная связь обеспечивается фасонкой и вставными элементами; - Достаточная прочность для использования в многоэтажных зданиях; - Элементы соединения сложны в изготовлении; - Не подходит для внутренних соединений из-за отсутствия рабочего пространства.
F6	Угловое, боковое - VH	1) Верхний блок 2) Нижний блок 3) Фасонка с фиксирующим штифтом 4) Болты	 [73]	- Вертикальная связь обеспечивается болтами; - Горизонтальная связь обеспечивается болтами и фасонкой; - Добавление ребер и увеличение высоты балки повышают прочностные характеристики; - Простота монтажа; - Необходимость в отверстиях для доступа к болтам; - Возможны ограничения при сложных условиях.
F7	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Верхний блок 2) Нижний блок 3) Фасонка 4) Гайка 5) Длинные болты 6) Трубчатый элемент	 [74]	- Вертикальное соединение обеспечивается длинными болтами; - Горизонтальное соединение обеспечивается фасонкой; - Приваренные гайки и трубчатые элементы усиливают болтовое соединение; - Сравнительно меньшие размеры элементов; - Быстрый монтаж.
F8	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Соедини-тельные блоки 2) Болт из сплава с памятью формы 3) Резиновый сердечник со стальными пластинами	 [75]	- Вертикальная связь обеспечивается болтами; - Горизонтальная связь обеспечивается сердечником; - Болт возвращает форму значительных деформаций; - Высокая пластичность; - Улучшенное распределение энергии; - Возможность многократного использования; - Подходит для модульного строительства в сейсмических районах.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

F9	Боковое - VH	1) Соедини-тельные блоки 2) Фасонка 3) Сдвиговые ключи 4) Болты с замковыми гайками	 [76]	- Вертикальная связь обеспечивается болтами и замковыми гайками; - Горизонтальная связь обеспечивается фасонкой и сдвиговыми ключами; - Эффективная передача нагрузок; - Простой монтаж; - Необходима дальнейшая оптимизация для устранения концентрации напряжений.; - Не подходит для внутренних соединений.
F10	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Соедини-тельные блоки 2) Фасонка 3) Конические болты 4) Гайки со внутренней и внешней резьбой 5) Направ-ляющие штыри	 [77]	- Вертикальная связь обеспечивается болтами; - Горизонтальная связь обеспечивается фасонкой; - Направляющие штыри повышают точность монтажа; - Простота монтажа и демонтажа без сварки; - Совместимость с разными сечениями балок; - Необходимы отверстия для доступа к болтам; - Соединение подходит для строительства в сейсмически активных зонах.

3.5 Inter-module self-locking connections / Межмодульные самозапирающиеся соединения

Межмодульные самозапирающиеся соединения представляют собой важный элемент в строительстве модульных зданий, обеспечивая структурную целостность и устойчивость конструкций. Общие особенности таких соединений включают их способность обеспечивать быструю и простую сборку без необходимости в болтовых или сварных соединениях на строительной площадке. Наиболее часто используемыми элементами являются механизмы защелкивания, замковые цилиндры, полосы с язычками и пазами, а также штифты и пластины.

Преимущества самозапирающихся соединений включают упрощение монтажа, улучшенную интеграцию модулей, сокращение времени сборки и снижение зависимости от точности на строительной площадке [10]. Например, системы с язычками и пазами, как в соединении (L1), обеспечивают быструю сборку и высокую устойчивость к сдвиговым нагрузкам. Аналогично, блоки с фрикционными механизмами, как в соединении (L2), демонстрируют высокую пластичность и способность поглощать энергию, что делает их подходящими для сейсмических нагрузок.

С другой стороны, недостатки таких соединений включают ограниченное сопротивление вертикальным растягивающим усилиям, как это видно в соединении (L1), что может потребовать дополнительного использования клеевых соединений. Также, некоторые соединения, например, (L3) и (L4), страдают от ограниченной боковой связи между модулями и необходимости высокой точности в изготовлении. Соединение (L5) требует высокого качества сварных швов и может иметь ограниченную гибкость при изгибающих моментах, а соединение (L6) обладает сложной конструкцией и отсутствием данных о механической прочности.

При сравнении с другими типами межмодульных соединений самозапирающиеся соединения выделяются своей простотой монтажа и возможностью автоматизации сборки. Они имеют преимущества перед традиционными сварными и болтовыми соединениями в плане скорости и удобства установки. Тем не менее, вопросы точности, прочности и устойчивости к различным типам нагрузок остаются актуальными.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Перспективы развития самозапирающихся соединений связаны с повышением их прочностных и деформационных характеристик, а также с созданием более простых и надежных конструкций. Дальнейшие исследования должны быть направлены на уменьшение строительных зазоров и оптимизацию размеров замковых цилиндров, что позволит повысить прочность соединений, устранить существующие недостатки и повысить эффективность модульного строительства.

Далее в хронологическом порядке приведен обзор разработанных на момент 2024 года межмодульных самозапирающихся соединений (L1-L7). Также краткая сводка по ним представлена в таблице 5.

Исследуемое в [21] межмодульное соединение (L1) представляет собой самозапирающийся механизм, разработанный для угловых модулей с опорой. Соединение использует специальные полосы с язычками и пазами, которые обеспечивают механическое соединение модулей, превращая их в единую непрерывную структуру. Горизонтальная и вертикальная связь осуществляется через систему «язычок-паз», закрепляемую на балках перекрытий и крыш модулей. Основное преимущество заключается в простоте и скорости монтажа без необходимости болтовых соединений на строительной площадке, а также в высокой устойчивости к сдвиговым нагрузкам. Однако система имеет ограничения по сопротивлению вертикальным растягивающим усилиям, что требует использования клеевых соединений для повышения несущей способности. Дополнительные сложности могут возникнуть при контроле допусков и выравнивании модулей. Преимущества включают улучшенную интеграцию модулей и возможность автоматизированной сборки, однако недостатки касаются ограниченной способности системы противостоять вертикальным нагрузкам и сложностей с контролем точности монтажа.

Межмодульное соединение (L2), предложенное в статье [78], представляет собой самозащелкивающийся коннектор, обеспечивающий вертикальное соединение модулей с помощью фрикционного механизма. Коннектор использует систему защелкивания между шпилькой и кольцевыми зубцами, что исключает необходимость болтовых соединений, упрощая и ускоряя монтаж. Соединительные блоки привариваются к балкам и угловым колоннам модулей, обеспечивая автоматическую фиксацию при сборке. Экспериментальные исследования показали, что соединение обладает высокой пластичностью и способностью к поглощению энергии, демонстрируя хорошее поведение при сейсмических нагрузках. Жесткость соединения достигает 80% от предельной жесткости жесткого соединения по Еврокоду 3, что позволяет классифицировать его как полужесткое. Однако данное соединение подходит только для угловых узлов и не учитывает горизонтальные связи между модулями, что ограничивает его применение.

Межмодульное соединение (L3) представляет собой поворотный коннектор, встроенный в угловые соединительные блоки модулей. Его конструкция включает вращающийся механизм, который позволяет быстро монтировать и демонтировать модули, обеспечивая надежную вертикальную связь. Коннектор вставляется в угловые блоки, оснащенные монтажными отверстиями, упрощающими процесс установки [20]. Экспериментальные исследования [79,80] выявили, что основным механизмом разрушения является локальная потеря устойчивости верхней пластины углового крепления нижнего модуля. Соединение классифицируется как полужесткое согласно Еврокоду 3. Ключевыми преимуществами соединения являются простота монтажа, исключающая необходимость сварки колонн и балок на месте, а также сокращение времени сборки. Однако конструкция имеет и ограничения: ограниченная боковая связь между модулями снижает ее эффективность при восприятии горизонтальных нагрузок, а необходимость резервирования пространства для установки на узловых углах может усложнять проектирование и сборку конструкций с высокой плотностью модулей.

Межмодульное соединение (L4) является самозапирающимся резиновым виброизоляционным узлом с соединением типа «язычок-паз» [6]. Верхние и нижние колонны оснащены язычками и пазами, обеспечивая механическое сцепление. В центре соединения расположена виброизоляционная резиновая опора, которая действует как горизонтальная фасонка, состоящая из верхней и нижней соединительных пластин, а также слоя сейсмоизоляции из резины, армированной тонкими стальными пластинами. Конструкция направлена на уменьшение влияния землетрясений, улучшение несущей способности, деформационной устойчивости и стабильности многоэтажных модульных зданий. Преимущества включают защиту от вибраций, однако сложность производства и монтажа может быть недостатком.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Изученное в [81] соединение (L5) представляет собой межмодульное соединение, включающее внутренний механизм с приводом и набор штифтов, активируемый инструментом через колонну, что обеспечивает зацепление внутренних и внешних компонентов. Вертикальная передача нагрузки в сжатии осуществляется за счет опоры поверхностей внутренних и внешних единиц, а в растяжении реализуется через штифты. Горизонтальная передача нагрузки обеспечивается передающей пластиной, удерживаемой внутренним механизмом. Основным недостатком является высокая требуемая точность изготовления, что усложняет учет больших допусков, характерных для строительных практик. Тем не менее, высокая точность в заводских условиях и использование автоматизации могут улучшить точность и снизить проблемы на строительной площадке. Преимущества соединения включают легкость монтажа и демонтажа, возможность удаленного управления механизмом, что способствует быстрой сборке на строительной площадке, несмотря на текущие ограничения по точности.

Соединение (L6), изученное в работах [11] и [82], представляет собой соединение с применением закладных металлических втулок, предназначенное для вертикального соединения колонн модулей. Конструкция включает стальные квадратные полые колонны и стальные втулки, которые автоматически фиксируются и заполняются высокопрочным цементным раствором. Исследования показали, что такое соединение обладает достаточной осевой несущей способностью, жесткостью и пластичностью, а также подходит для соединения в многоэтажных зданиях. Однако требуется высокое качество сварных швов модулей и ограниченная гибкость соединений при больших изгибающих моментах.

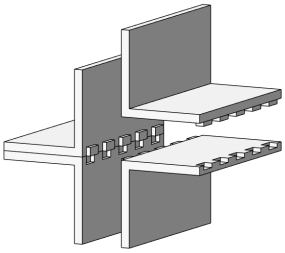
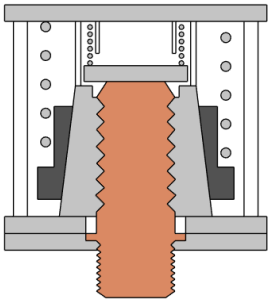
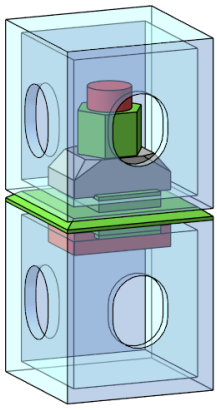
Межмодульное соединение (L7), разработанное с использованием самоблокирующихся устройств, основано на пружинных механизмах, которые значительно снижают необходимость участия человека в установке на строительной площадке [6,83]. Соединение состоит из нескольких элементов: штекера, скользящего блока, боковых и верхних пластин, а также возвратной пружины. Штекер закрепляется на колонне верхнего модуля, а скользящие пластины и пружина закрепляются на колонне нижнего модуля. При монтаже модуля скользящие пластины смещаются, блокируя соединение. Соединение демонстрирует простоту установки, отсутствие необходимости в рабочем пространстве и высокую скорость монтажа. Однако оно является сложной для изготовления конструкцией с большим количеством компонентов, а также отсутствуют данные о механической прочности.

В статье [84] предложена система соединений, включающая вертикальные колонные (L8) и горизонтальные (L9) самозапирающиеся соединения. Вертикальное соединение включает автоматический самозапирающийся механизм с использованием соединительных элементов с пружинами и фасонкой. Оно предназначено для обеспечения устойчивости при воздействии вертикальных и сейсмических нагрузок. Горизонтальное соединение между балками реализовано через сигмовидные клипсы и пазы (male-female), которые обеспечивают надежную фиксацию горизонтальных элементов. Эти клипсы запираются, образуя жесткую структуру, которая эффективно передает горизонтальные нагрузки между модулями и увеличивает общую жесткость каркаса. Использование системы из данных соединений предусматривает отсутствие необходимости в сварке и болтовых соединениях на месте, а также простоту монтажа. Однако ключевым недостатком является необходимость высокой точности при сборке для правильного функционирования механизмов запирания.

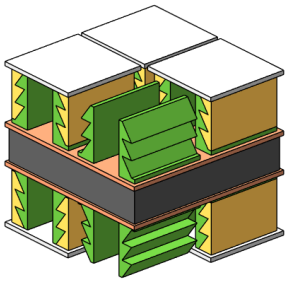
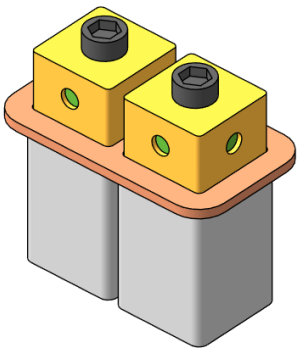
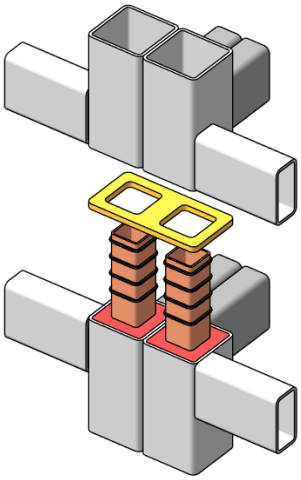
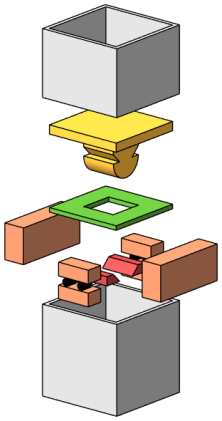
Межмодульное соединение (L10) представляет собой самозапирающееся соединение, включающее два вставных замковых блока, замковую пластину и внутреннюю вставную пластину [85,86]. Это соединение проектировалось с целью решения проблем сложного монтажа на строительной площадке и обеспечения высокого качества установки. Основные достоинства данной системы включают улучшенные прочностные и деформационные свойства и простоту установки, однако недостатки связаны с потенциальными проблемами, такими как хрупкое разрушение соединения по сварным швам и необходимость высокой точности при изготовлении и монтаже. Рекомендуется уменьшение строительного зазора и увеличение размера замкового цилиндра для повышения прочности соединения.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

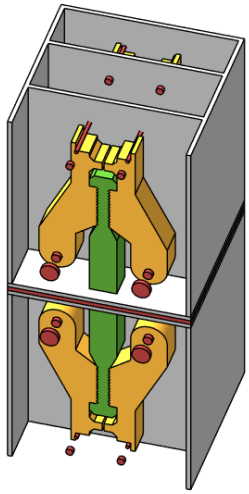
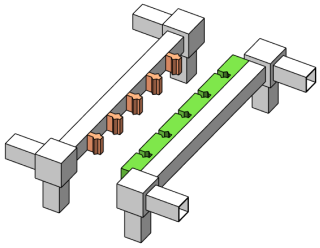
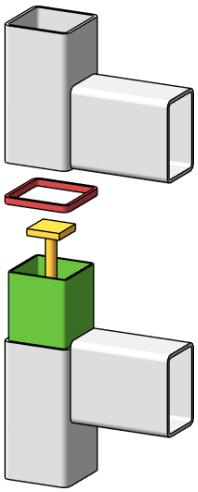
Таблица 5. Межмодульные самозапирающиеся соединения
Table 5. Inter-module self-locking connections

№	Тип по месту и направ-лению связи	Основные соединяющие элементы	Иллюстрация [Источник]	Ключевые особенности
L1	Вдоль балок - VH	1) Полосы с язычками и пазами	 [21]	- Вертикальная и горизонтальная связь осуществляется через соединение язычков и пазов; - Высокое сопротивление сдвиговым нагрузкам; - Высокая общая стабильность здания; - Быстрый и простой монтаж; - Возможны сложности с контролем допусков и выравниванием модулей при сборке; - Не обеспечивает достаточную жесткость по плоскости здания.
L2	Угловое - VC	1) Резьбовая шпилька 2) Резьбовой конус 3) Самозащел-кивающийся механизм 4) Соедини-тельные блоки	 [78]	- Вертикальная связь обеспечивается соединением блоков через резьбовую шпильку и конус; - Соединение фиксируется за счет самозащелкивающегося механизма; - Быстрый и простой монтаж; - Нет необходимости в дополнительном пространстве для установки болтов; - Высокая сейсмостойкость; - Соединение является полужестким.
L3	Угловое - VC	1) Соедини-тельные блоки 2) Коннектор, состоящий из соединитель-ной пластины и поворотного механизма	 [20], [79], [80]	- Соединение обеспечивает только вертикальную связь; - Использование блоков упрощает сборку и демонтаж; - Соединение является полужестким; - Основным режимом разрушения является локальная потеря устойчивости пластины; - Требует пространство для монтажа; - Высокая пластичность и энергоемкость; - Соединение разработано для средне-этажных зданий.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

L4	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Язычки и пазы 2) Виброизо-ляционная опора	 [6]	- Язычки и пазы обеспечивают механическое сцепление; - Виброизоляционная опора включает верхнюю и нижнюю соединительные пластины, а также слой сейсмоизоляции; - Снижает воздействие землетрясений; - Улучшает несущую способность, деформационную устойчивость и стабильность высоких модульных зданий.
L5	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Внутренний компонент со штифтами 2) Внешний компонент 3) Сдвиговая пластина	 [81]	- Вертикальная связь обеспечивается внутренним, внешним компонентами и штифтами; - Горизонтальная связь обеспечивается сдвиговой пластиной; - Требуется высокая точность изготовления и монтажа; - Быстрый и простой монтаж; - Нет необходимости в рабочем пространстве и доступе к соединению.
L6	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Закладная втулка в двух вариантах: с выступами и отверстиями для сцепления с цементным раствором 2) Торцевые колонные пластины 3) Стяжная пластина	 [11], [82]	- Вертикальная связь обеспечивается сцеплением высокопрочного цементного раствора внутри полой колонны со стальной втулкой; - Горизонтальная связь обеспечивается стяжной пластиной; - Быстрая сборка; - Увеличение прочности раствора на 37% повышает осевую прочность на 30%; - Полужесткое соединение, устойчивое к изгибу, подходит для многоэтажных зданий; - При больших изгибающих моментах гибкость ограничена.
L7	Угловое, боковое, внутреннее - VC	1) Штекер на торцевой пластине верхней колонны; 2) Скользящие блоки; 3) Скользящая пластина; 4) Пружинный механизм	 [6], [83]	- Вертикальная связь обеспечивается соединением штекера со скользящими блоками и пластиной; - Автоматическая фиксация и блокировка соединения за счет пружинного механизма; - Не требует рабочего пространства и учета допусков; - Быстрый и простой монтаж; - Сложное изготовление элементов соединения; - Механическая прочность не исследована.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

L8	Угловое, боковое, внутреннее - VC	1) Фасонка 2) Соединительные блоки 3) Самозапирающиеся элементы male-female с пружинами	 [84]	- Вертикальное соединение основано на пружинном механизме соединения элементов male-female; - Высокая устойчивость к вертикальным и сейсмическим нагрузкам; - Более высокое сопротивление растяжению, чем у аналогов; - Быстрый и простой монтаж; - Требует высокой точности изготовления и сборки.
L9	Вдоль балок - HC	1) Сигмовидные клипсы 2) Сигмовидные пазы	 [84]	- Горизонтальное соединение обеспечивается системой с клипсами и пазами (male-female); - Жесткая фиксация и передача горизонтальных нагрузок; - Быстрый и простой монтаж; - Требует высокой точности изготовления и сборки.
L10	Угловое, боковое, внутреннее -	1) Верхний запирающий цилиндр с пружиной 2) Нижний запирающий цилиндр 3) Соединительная пластина	 [85], [86]	- Вертикальная связь обеспечивается запирающими цилиндрами; - Горизонтальная связь обеспечивается соединительной пластиной; - Разрушение по сварному шву; - Предел прочности на растяжение достигает 293 кН; - Быстрый и простой монтаж; - Усиление наклонными пластинами увеличивает жесткость и несущую способность.

3.6 Tie-rod inter-module connections / Натяжные стержневые межмодульные соединения

Натяжные стержневые межмодульные соединения представляют собой технологию, в которой вертикальные пред- либо пост-напряженные стержни проходят через полые сечения колонн модулей для их соединения [16]. Эти стержни натягиваются с помощью муфт или гаек для создания прочной связи между модулями. Основной особенностью данного типа соединений является использование сдвигающих шпонок, которые помогают противостоять сдвигу между колоннами, улучшая распределение нагрузки [27]. Данные соединения предоставляют возможность монтажа за пределами модулей, что снижает риск повреждения внутренней отделки и упрощает монтаж, особенно для многоэтажных зданий с колоннами из композитных материалов (сталь-бетон) [17]. Это особенно важно для высотных зданий, где необходимы высокие показатели прочности и жесткости колонн, что обеспечивается за счет использования высокопрочных сталей и бетонов.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Основное преимущество натяжных стержневых соединений заключается в их высокой осевой несущей способности и возможности сопротивляться сдвигающим силам, благодаря сдвигающим шпонкам и натяжным стержням [87]. Эти соединения также не требуют использования болтов или сварки в процессе сборки, что делает их менее подверженными структурным повреждениям и коррозии. Однако они имеют и ряд недостатков. В частности, такие соединения обладают ограниченным сопротивлением моменту, что может приводить к снижению жесткости каркаса здания и увеличению бокового прогиба при высоких нагрузках [46]. Это делает их менее подходящими для высотных зданий, где важна высокая жесткость.

Кроме того, использование натяжных стержневых соединений может вызвать сложности при монтаже, особенно если каждое соединение требует установки нескольких стержней на колонну. При натяжении стержней на стройплощадке и необходимость оставлять отверстия для доступа, которые могут ослабить конструкцию. Вдобавок низкая сопротивляемость моменту также может привести к деформации соединений при высоких нагрузках, что требует дополнительной проработки конструктивных решений для повышения жесткости.

В сравнении с другими типами соединений, такими как болтовые или сварные, натяжные стержневые соединения демонстрируют лучшую осевую прочность, но уступают в гибкости и способности сопротивляться изгибу. Их использование наиболее эффективно в зданиях средней этажности, где требуется высокая прочность при ограниченных требованиях к сопротивлению моменту [6]. В перспективе, данная технология может быть улучшена за счет использования композитных материалов и повышения жесткости соединений, что сделает их более подходящими для высотных конструкций.

Далее в хронологическом порядке приведен обзор разработанных на момент 2024 года межмодульных натяжных стержневых соединений (R1-R7). Также краткая сводка по ним представлена в таблице 6.

Межмодульное соединение (R1) является запатентованным [88] и представляет собой конструкцию с использованием резьбовых стяжных стержней, соединенных муфтами и обычными болтами натяжения. Вертикальная связь обеспечивается резьбовыми стержнями, проходящими через полые вертикальные элементы колонн и соединенными с передающими пластинами при помощи муфт. Горизонтальная связь достигается посредством передающей пластины, закрепляемой болтами через соединительные пластины, приваренные к балкам перекрытий модулей. Основное преимущество этой системы заключается в упрощении выравнивания модулей при сборке благодаря геометрическим формам передающей пластины. Однако, недостатком является замедление строительства на месте из-за дополнительных задач по постнатяжению по сравнению с полностью болтовыми соединениями. Также конструкция не полностью соответствует архитектурным требованиям из-за необходимости болтового соединения балок.

Межмодульное соединение (R2) [49] представляет собой постнатяжную систему с использованием натяжных стержней, соединяющих колонны модулей. Для сопротивления сдвиговым усилиям применяются шпонки, а горизонтальная связь между модулями обеспечивается с помощью фасонных пластин, что делает соединение подходящим для внутренних узлов. Соединение может применяться как для композитных, так и для полых модульных колонн. Оно демонстрирует полужесткое поведение, но обладает низкой способностью к вращению из-за использования только одного натяжного стержня, что делает его непригодным для высотных зданий. Преимущества соединения включают устойчивость к проникновению воды, отсутствие необходимости в дополнительных отверстиях для монтажа и снижение затрат на огнезащиту благодаря бетонному заполнению колонн. Однако трудоемкость монтажа арматуры, опасность при установке верхних модулей, а также ограниченные возможности для инспекции после сборки являются существенными недостатками.

В статьях [87] и [89] проведено исследование межмодульного соединения (R3) с предварительным натяжением для угловых стальных модульных зданий, которое включает вертикальное соединение колонн с помощью предварительно натянутых стержней, проходящих через полые стальные колонны, заполненные бетоном. Основные конструктивные особенности включают использование уплотнительных пластин с ребрами жесткости и отверстиями для стержней, сдвиговых блоков для противодействия сдвигающим усилиям и стержней для предотвращения разрушения бетона и повышения пластичности. Достоинства соединения заключаются в адекватном распределении осевой силы и улучшенной пластичности, а также в способности предотвратить локальное смятие трубы благодаря заливу бетона. Тем не менее,

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

имеются проблемы с недостаточной вращательной жесткостью между модулями и возможностью разъединения секций при боковом изгибе, что ограничивает его использование в высоких зданиях.

В статьях [90]–[92] рассмотрено межмодульное соединение (R4) для стальных модульных зданий, которое включает вертикальные и горизонтальные соединения. Основные элементы конструкции включают композит из стали и бетона, а также тонкую систему перекрытий для уменьшения высоты этажей. Для вертикального соединения используется натянутый стержень, который предотвращает разделение модулей при высоких боковых нагрузках. Горизонтальные соединения обеспечиваются ласточкиными пластинами, которые передают боковые силы и помогают выравниванию колонн. Использование высокопрочного бетона в колоннах позволяет избежать сложных соединений. Система обеспечивает быструю сборку и устойчивость при боковых нагрузках, однако вертикальные соединения могут не всегда эффективно передавать горизонтальные силы, что может привести к деформациям при боковом изгибе.

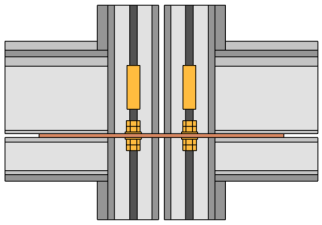
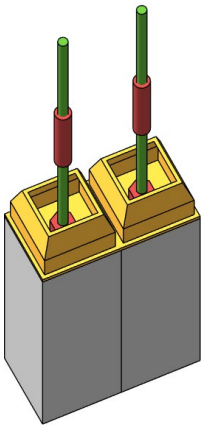
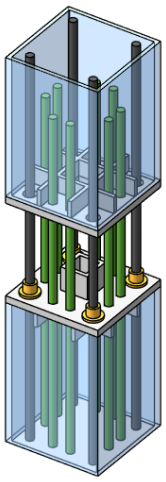
Предложенное в [93] межмодульное соединение (R5), состоящее из стального короба, помещенного между двумя модулями, и резьбового стержня. Стальной короб выполняет функции соединительной пластины и шпонки, обеспечивая сопротивление сдвигу и выравнивание колонн. Он также обеспечивает сопротивление растяжению за счет контакта с внутренней поверхностью полой стальной колонны. Вертикальная связь обеспечивается преднапряженным резьбовым стержнем, закрепленным на торцевых пластинах, привариваемых к концам колонн. Сейсмические испытания показали, что это соединение обладает аналогичной боковой жесткостью и более высокой способностью к рассеиванию энергии по сравнению со сварным соединением, предотвращая локальное смятие. Данная система улучшает сопротивление сдвигу и устойчивость соединений, но демонстрирует полужесткое поведение, что может потребовать дополнительных расчетов для обеспечения полной структурной надежности.

Межмодульное соединение (R6), предложенное в [94], включает вертикальное соединение через предварительно напряженный резьбовой стержень и шпонку. Шпонка состоит из полых секций, приваренных к пластинам, и расположена внутри полых квадратных колонн модулей. Необходимы отверстия для доступа, которые позволяют установить резьбовой стержень и натянуть его изнутри модуля, минимизируя необходимость работы на высоте. Это соединение демонстрирует большую начальную жесткость при скольжении по сравнению с ранее разработанными вариантами и позволяет легко демонтировать и переустанавливать модули. Однако оно ограничено только вертикальным соединением, и требуется дополнительное усиление для обеспечения горизонтального соединения. Возможные сложности могут возникнуть при установке стержня через доступные отверстия, что может привести к локальным повреждениям.

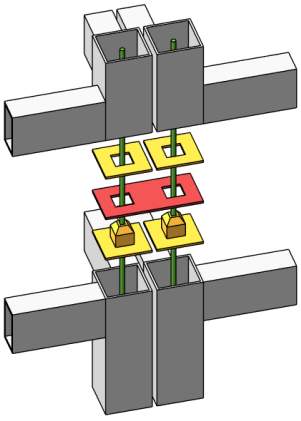
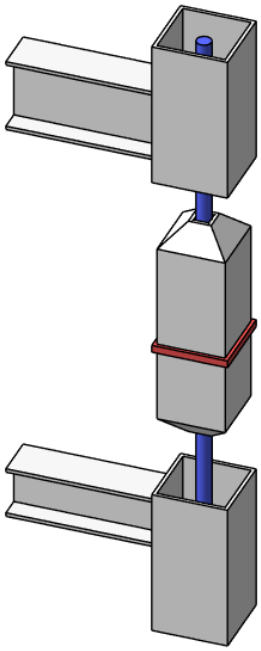
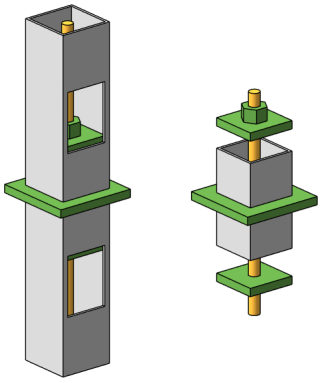
Соединение типа «AJ» (R7), разработанное для стальных модульных зданий, представляет собой инновационное безболтовое преднапряженное межмодульное соединение [95]. Его конструкция основана на использовании натяжных стержней из высокопрочной стали, размещенных внутри полых колонн, которые соединяются при помощи специальных муфт. Вертикальная связь между модулями достигается за счет приложения предварительного натяжения с использованием крутящего или ударного гаечного ключа, что существенно ускоряет процесс сборки и демонтажа. Горизонтальная связь обеспечивается посредством фасонок. Основные преимущества соединения заключаются в простоте монтажа, повышении скорости строительства, улучшении безопасности рабочих и возможности использования полностью готовых модулей, собранных на заводе. Кроме того, отсутствует необходимость в дополнительных отверстиях в колоннах для установки соединений, что позволяет сохранить их полную прочность. Однако среди недостатков можно выделить снижение жесткости конструкции при возникновении зазоров между модулями и проскальзывании, что может вызвать преждевременное разрушение соединений и повысить риск выхода SRB из строя из-за локальных напряжений.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

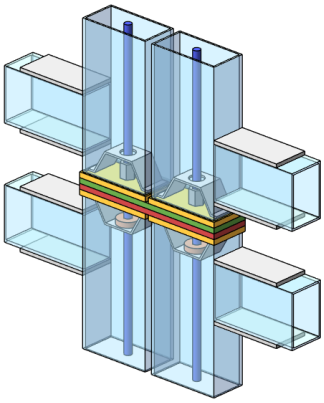
Таблица 6. Натяжные стержневые межмодульные соединения
Table 6. Tie-rod inter-module connections

№	Тип по месту соединения и направ-лению связи	Основные соединяющие элементы	Иллюстрация [Источник]	Ключевые особенности
R1	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Резьбовые стяжные стержни 2) Муфты 3) Передаю-щая пластина 4) Соедини-тельные пластины 5) Болты	 [88]	- Вертикальная связь обеспечивается через резьбовые стержни; - Горизонтальная связь реализуется с помощью передающей пластины, закрепляемой болтами; - Форма передающей пластины облегчает выравнивание модулей при сборке; - Не совместимо с готовой отделкой модулей из-за болтового соединения балок; - Подходит для многоэтажных зданий.
R2	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Натяжные стержни 2) Муфты 3) Вставной элемент с соединитель-ной пластиной и шпонками	 [6], [49]	- Вертикальная связь обеспечивается натяжными стержнями и муфтами; - Горизонтальная связь обеспечивается соединительной пластиной; - Шпонки обеспечивают сопротивление сдвигу; - Не нарушает отделку; - Полужесткое соединение; - Низкое сопротивление моменту вращения; - Трудности с монтажом и доступом для инспекции.
R3	Угловое - VC	1) Натяжные стержни 2) Сдвиговой блок 3) Вставные стержни	 [87], [89]	- Соединяет стальные полые колонны, заполненные бетоном; - Вертикальная связь обеспечивается через натянутые стержни; - Сдвиговые блоки и сцепление натяжных стержней с бетоном обеспечивают сопротивление сдвигу; - Удобство монтажа; - Хорошая прочность и пластичность; - Плохо сопротивляется крутящим нагрузкам; - Возможно разъединение при боковом изгибе.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

R4	Боковое, внутреннее - VH	1) Натяжные стержни 2) Фасонка 3) Нижняя торцевая пластина со шпонкой 3) Верхняя торцевая пластина	 [90], [91], [92]	- Вертикальная связь обеспечивается натяжными стержнями; - Горизонтальная связь обеспечивается фасонкой; - Фасонка обеспечивает выравнивание модулей при монтаже; - Сталебетонная конструкция модулей; - Соединение является полужестким; - Хорошо передает горизонтальные нагрузки
R5	Угловое, боковое, внутреннее - VH	1) Пост-напряженный резьбовой стержень 2) Вставной стальной короб с пластиной для крепления стержней	 [93]	- Вертикальная связь обеспечивается пост-напряженными резьбовыми стержнями; - Горизонтальная связь обеспечивается вставным стальным коробом; - Вставной стальной короб обеспечивает сопротивление сдвигу, растяжению и локальному смятию; - Простое выравнивание модулей и монтаж; - Полужесткое соединение; - Аналогичная боковая жесткость и более эффективное рассеивание энергии по сравнению со сварным соединением.
R6	Угловое - VC	1) Пред-напряженный резьбовой стержень 2) Фасонка 3) Полые срезные шпонки 4) Пластины для фиксации стержней	 [94]	- Вертикальная связь обеспечивается резьбовым стержнем и контактом шпонок с колоннами; - Горизонтальная связь может быть обеспечена через фасонку; - Отверстия в колоннах для доступа во время монтажа; - Форма отверстий способствует концентрации напряжений; - Простота монтажа и демонтажа; - Соединение полностью сокрыто внутри колонны; - Возможны локальные повреждения.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

R7	Боковое - VH	1) Преднапряженные стержни 2) Соединительные пластины 3) Торцевые пластины 4) Муфты 5) Кронштейны для фиксации стержней	 [95]	- Вертикальная связь обеспечивается соединением преднапряженных стержней; - Горизонтальная связь обеспечивается через фасонки; - Быстрая и простая сборка и демонтаж, преднатяжение с помощью крутящего ключа; - При нагрузках возможно образование зазоров и проскальзывание, приводящие к снижению жесткости; - Необходимы дальнейшие исследования усталостной прочности.

3.7 Comparative analysis

Каждый тип межмодульных соединений обладает своими уникальными конструктивными и механическими характеристиками, что делает их пригодными для определенных строительных задач. Основные параметры, такие как прочность, жесткость, сейсмостойкость и способность к деформации, варьируются в зависимости от типа соединения. В таблице 7 проведен сравнительный анализ различных типов межмодульных соединений. Этот анализ позволяет выявить, какие соединения наиболее эффективны в конкретных условиях, например, при строительстве высотных зданий, в условиях сейсмической активности или при необходимости быстрой сборки и разборки конструкций.

Таблица 7. Сравнительный анализ межмодульных соединений
Table 7. Comparative analysis of inter-module connections

Критерий	Сварные соединения	Болтовые соединения	Самозапираю-щиеся соединения	Натяжные стержневые соединения
Прочность	Максимальная	Средняя для соединений с соединитель-ными блоками, высокая для остальных	Высокая	Высокая осевая, но ограниченная боковая
Жесткость	Очень высокая	Средняя, зависит от конфигурации соединения	Ограничена, подходит для применения в комбинации с другими соединениями	Высокая осевая жесткость, но недостаточная жесткость к изгибу
Пластичность	Низкая, хрупкое разрушение	Средняя, зависит от типа болтов и конфигурации соединения	Высокая в вертикальной плоскости, ограничена в горизонтальной	Средняя, зависит от качества натяжения стержней и заполнения колонн
Устойчивость к боковым нагрузками	Высокая	Умеренная, зависит от качества болтов и конструктивных элементов	Ограничена	Сильно различается и зависит от конфигурации

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Сейсмостой-кость	Низкая	Средне-высокая, сильно зависит от конфигурации соединения и от качества монтажа	Высокая	Высокая
Сложность монтажа	Высокая, требуется квалифициро-ванный персонал и специальное оборудование	Низкая, но требуется высокая точность	Низкая	Средняя, требуется специальное оборудование и точный контроль натяжения стержней
Нарушение отделки при монтаже	Возможны повреждения	В зависимости от расположения и конфигурации соединения	Минимальное	Минимальное в большинстве случаев
Разборность	Неразборные	Разборные, простой демонтаж	Разборные, простой демонтаж	Разборные, демонтаж осложнен натяжением
Применение	Здания с повышенными требованиями к прочности	Средне- и многоэтажные здания	Низко- и средне-этажные здания, временные здания	Многоэтажные и высотные здания, стальные и сталебетонные колонны

Одним из основных преимуществ модульного строительства как такового является удобство возведения здания на строительной площадке. С данной точки зрения сварные соединения являются самыми невыгодными и, как уже было сказано ранее, на данный момент практически не исследуются.

С другой стороны, чем большую степень отделки имеют модули возводимого здания, тем сложнее доступ к рабочему пространству для установки межмодульных соединений. Данная связь приводит к необходимости искать компромисс между удобством монтажа и степенью готовности модулей. Например, болтовые балочные межмодульные соединения требуют доступ для соединения балок, что нарушит полностью готовую отделку. В данном случае можно либо упростить соединение и тем самым уменьшить необходимое пространство для доступа и монтажа, либо обеспечить достаточное пространство для монтажа, пожертвовав степенью готовности отделки [35].

4 Conclusions

В данной обзорной статье был проведен всесторонний анализ межмодульных соединений, используемых в модульном строительстве. Рассмотрены их механические, конструктивные и монтажные характеристики. Особое внимание уделено сравнительному анализу с точки зрения их применимости в разных условиях, а также преимуществам и недостаткам каждого типа. В результате проведенного исследования сделаны следующие выводы.

1. Начиная с 2019 года наблюдается рост публикационной активности в области изучения межмодульных соединений. Лидером по количеству исследований является Китай. Основное внимание уделяется таким аспектам, как прочность, несущая способность, сейсмическое поведение и рассеивание энергии. Эти темы доминируют в научных исследованиях, что отражает необходимость разработки эффективных конструктивных решений для обеспечения устойчивости модульных зданий в условиях экстремальных нагрузок, таких как землетрясения и другие динамические воздействия. Выявлена высокая концентрация исследований, направленных на совершенствование модульных конструкций с точки зрения прочности

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

материалов и устойчивости к разрушению, а также повышения долговечности межмодульных соединений.

2. Предложена подробная классификация межмодульных соединений, созданная на основе изученной литературы. Все типы межмодульных соединений могут быть классифицированы по способу соединения (сварные, болтовые, самозапирающиеся и натяжные стержневые) и по типу соединяемых элементов модуля (колонны, балки и соединительные блоки для болтовых соединений). Эта классификация позволяет структурировать подходы к их применению и выделить ключевые особенности. Она может быть легко расширена и детализирована по мере появления новых соединений.

3. Каждый тип межмодульного соединения имеет свои преимущества и недостатки в зависимости от условий эксплуатации и проектных требований. Сварные соединения обеспечивают максимальную прочность и жесткость, однако требуют сложного монтажа и квалифицированных рабочих. Болтовые колонные и балочные соединения удобны в монтаже, обладают хорошей прочностью и жесткостью, что делает их популярными в строительстве высотных зданий. Болтовые соединения с соединительными блоками обеспечивают легкость монтажа и демонтажа, особенно в условиях временных конструкций. Самозапирающиеся соединения обеспечивают автоматизированный процесс сборки, но ограничены по прочности. Натяжные стержневые соединения демонстрируют высокую прочность и устойчивость, особенно для высотных зданий и строительства в сейсмически активных зонах, но требуют точной настройки и специализированного оборудования.

4. На момент проведения обзора болтовые межмодульные соединения остаются одним из наиболее универсальных и востребованных решений в модульном строительстве, в то время как сварные потеряли свою актуальность.

5. Большинство решений межмодульных соединений ограничено средне- либо многоэтажными зданиями. Для высотных здания подходят только натяжные стержневые соединения, и то не все.

6. Выбор типа соединения должен основываться на специфике проекта. Для проектов, где важна разборка и модификация зданий, предпочтительны болтовые и самозапирающиеся соединения. В условиях сейсмических воздействий лучше использовать самозапирающиеся и натяжные стержневые соединения, которые обеспечивают высокую гибкость и устойчивость к деформациям. Сварные соединения целесообразно применять там, где необходима максимальная прочность и не требуется разборка конструкции.

На основе проведенного обзора можно выделить несколько направлений для дальнейшего исследования в области межмодульных соединений.

1. Разработка межмодульных соединений из новых материалов. Использование инновационных материалов, таких как полимерные композитные материалы, высокопрочные стали и сплавы с памятью формы, требует дальнейших исследований.

2. Улучшение существующих и разработка новых конструкций межмодульных соединений в рамках уже используемых материалов и типов.

3. Проведение дополнительных экспериментальных исследований для проверки результатов численного моделирования.

4. Исследования, направленные на создание упрощенных моделей и методов расчета межмодульных соединений для инженеров, которые позволят быстрее и точнее проектировать соединения без использования сложных программных комплексов.

5. Разработка более детализированных руководств по проектированию, которые учитывали бы особенности модульного, в частности механизмы передачи нагрузки через межмодульные соединения, их особенности и разнообразие конструктивных решений.

6. Разработка соединений, которые легко интегрируются с автоматизированными системами сборки, что в перспективе снизит трудоемкость и затраты при возведении модульных зданий.

5 Acknowledgements

Авторы выражают благодарность профессору федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (Санкт-Петербург, Российская Федерация), доктору технических наук Ватину Николаю Ивановичу за полезные замечания, высказанные в процессе подготовки статьи.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

References

1 Srisangeerthanan, S., Hashemi, M.J., Rajeev, P., Gad, E. and Fernando, S. (2020) Review of Performance Requirements for Inter-Module Connections in Multi-Story Modular Buildings. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **28**, 101087. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101087

2 Shirokov, V. (2022) Design Features of Modular Buildings. *The Eurasian Scientific Journal*, **14**, 1–15. https://doi.org/10.15862/03savn322

3 Kotlyarskaya (Vasileva), I.L., Sinelnikov, A.S., Iakovlev, N.A., Vatin, N.I. and Gravit, M.V. (2022) Structural and Technological Features of Modular Multi-Storey Buildings. A Review. *AlfaBuild*, **23**. https://doi.org/10.57728/ALF.23.4

4 Xu, Z., Zayed, T. and Niu, Y. (2020) Comparative Analysis of Modular Construction Practices in Mainland China, Hong Kong and Singapore. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **245**, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118861

5 Jammi, A. and Sanjeevi, A.J. (2021) Structural Performance of Modular Buildings: A Review. Recent Trends in Civil Engineering, 19–42. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5195-6_2

6 Chen, Z., Khan, K., Khan, A., Javed, K. and Liu, J. (2021) Exploration of the Multidirectional Stability and Response of Prefabricated Volumetric Modular Steel Structures. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **184**. https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2021.106826

7 Wang, Z. and Tsavdaridis, K.D. (2022) Optimality Criteria-Based Minimum-Weight Design Method for Modular Building Systems Subjected to Generalised Stiffness Constraints: A Comparative Study. *Engineering Structures*, Elsevier, **251**, 113472. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.113472

8 Hwan Doh, J., Ho, N.M., Miller, D., Peters, T., Carlson, D. and Lai, P. (2017) Steel Bracket Connection on Modular Buildings. *Journal of Steel Structures & Construction*, **02**. https://doi.org/10.4172/2472-0437.1000121

9 Brissi, S.G., Debs, L. and Elwakil, E. (2021) A Review on the Factors Affecting the Use of Offsite Construction in Multifamily Housing in the United States. *Buildings*, MDPI AG, **11**, 1–23. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS11010005

10 Yang, C., Xu, B., Xia, J., Chang, H., Chen, X. and Ma, R. (2023) Mechanical Behaviors of Inter-Module Connections and Assembled Joints in Modular Steel Buildings: A Comprehensive Review. *Buildings*, **13**, 1727. https://doi.org/10.3390/buildings13071727

11 Dai, Z., Pang, S.D. and Liew, J.R. (2020) Axial Load Resistance of Grouted Sleeve Connection for Modular Construction. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd, **154**, 22. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106883

12 Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T.D., Manalo, A. and Mendis, P. (2019) New Advancements, Challenges and Opportunities of Multi-Storey Modular Buildings – A State-of-the-Art Review. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **183**, 883–893. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.061

13 Zhang, G., Xu, L.-H. and Li, Z.-X. (2021) Development and Seismic Retrofit of an Innovative Modular Steel Structure Connection Using Symmetrical Self-Centering Haunch Braces. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **229**, 111671. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111671

14 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2019) Review of Bolted Inter-Module Connections in Modular Steel Buildings. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **23**, 207–219. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.01.035

15 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2018) Structural Response of Modular Buildings – An Overview. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **16**, 45–56. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2017.12.008

16 Dan-Adrian, C. and Tsavdaridis, K.D. (2022) A Comprehensive Review and Classification of Inter-Module Connections for Hot-Rolled Steel Modular Building Systems. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **50**, 1–33. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104006

17 Thai, H.T., Ngo, T. and Uy, B. (2020) A Review on Modular Construction for High-Rise Buildings. *Structures*, Elsevier Ltd, **28**, 1265–1290. https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2020.09.070

18 Rajanayagam, H., Poologanathan, K., Gatheeshgar, P., Varelis, G.E., Sherlock, P., Nagaratnam, B. and Hackney, P. (2021) A-State-Of-The-Art Review on Modular Building Connections. *Structures*, Elsevier, **34**, 1903–1922. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.114

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

19 Vedyakov, I.I., Suslov, L.S., Marisiuk, A.A., Kashin, O. V. and Novozhilov, M. V. (2023) Bearing Capacity of a Steel Frame of a Multi-Storey Modular Building with Consideration of the Rigidity of Quick-Assembled Connections. *Earthquake Engineering. Construction Safety*, 8–44. https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-6-8-44

20 Zhong, X., Chen, Z., Liu, J., Liu, Y. and Liu, X. (2022) Experimental Research on the In-Plane Performance of Discontinuous Modular Diaphragms. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd., **173**, 1–21. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.108905

21 Sharafi, P., Mortazavi, M., Samali, B. and Ronagh, H. (2018) Interlocking System for Enhancing the Integrity of Multi-Storey Modular Buildings. *Automation in Construction*, **85**, 263–272. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.023

22 Deng, E.F., Zong, L., Ding, Y., Zhang, Z., Zhang, J.F., Shi, F.W., Cai, L.M. and Gao, S.C. (2020) Seismic Performance of Mid-to-High Rise Modular Steel Construction - A Critical Review. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd, **155**, 1–19. https://doi.org/10.1016/J.TWS.2020.106924

23 Zhengyao, L., Tsavdaridis, K.D. and Gardner, L. (2021) Industrializing Additive Manufacturing. In: Meboldt, M. and Klahn, C., Eds., Industrializing Additive Manufacturing, Springer International Publishing, Cham, 357–373. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54334-1

24 Nadeem, G., Safiee, N.A., Bakar, N.A., Karim, I.A. and Nasir, N.A.M. (2021) Connection Design in Modular Steel Construction: A Review. *Structures*, Elsevier Ltd, **33**, 3239–3256. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.060

25 Zong, L., Fang, W., Zhang, Y. and Cui, J. (2024) Progressive Collapse Analysis on Modular Steel Construction Based on a Simplified Joint Model. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd, **198**, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111733

26 Lacey, A.W., Chen, W. and Hao, H. (2022) Experimental Methods for Inter-Module Joints in Modular Building Structures – A State-of-the-Art Review. *Journal of Building Engineering*, **46**, 103792. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103792

27 Chourasia, A., Singhal, S. and Manivannan. (2022) Prefabricated Volumetric Modular Construction: A Review on Current Systems, Challenges, and Future Prospects. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **28**, 1–16. https://doi.org/10.1061/PPSCFX.SCENG-1185

28 Tsavdaridis, K.D. and Corfar, D.A. (2022) Modular Building Connections: A Review. *3th International Conference Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience*, Irbid. https://www.researchgate.net/publication/360547402_Modular_Building_Connections_-_A_review

29 Rajanayagam, H., Gunawardena, T., Mendis, P., Poologanathan, K., Gatheeshgar, P., Dissanayake, M. and Corradi, M. (2022) Evaluation of Inter-Modular Connection Behaviour under Lateral Loads: An Experimental and Numerical Study. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **194**, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107335

30 Choi, K. and Kim, H. (2015) An Analytical Study on Rotational Capacity of Beam-Column Joints in Unit Modular Frames. *International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering*, **9**, 100–103. https://publications.waset.org/10000322.pdf

31 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2019) New Interlocking Inter-Module Connection for Modular Steel Buildings: Experimental and Numerical Studies. *Engineering Structures*, Elsevier, **198**, 1–15. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.109465

32 Annan, C.D., Youssef, M.A. and El Naggar, M.H. (2009) Seismic Overstrength in Braced Drames of Modular Steel Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, **13**, 1–21. https://doi.org/10.1080/13632460802212576

33 Annan, C.D., Youssef, M.A. and El Naggar, M.H. (2009) Experimental Evaluation of the Seismic Performance of Modular Steel-Braced Frames. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **31**, 1435–1446. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.024

34 Fathieh, A. and Mercan, O. (2016) Seismic Evaluation of Modular Steel Buildings. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **122**, 83–92. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.054

35 Ye, Z., Giriunas, K., Sezen, H., Wu, G. and Feng, D.-C.D.C. (2021) State-of-the-Art Review and Investigation of Structural Stability in Multi-Story Modular Buildings. *Journal of Building Engineering*, **33**, 2352–7102. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101844

36 Styles, A.J., Luo, F.J., Bai, Y., Murray-Parkes, J.B., Mair, R.J., Soga, K., Jin, Y., Parlikad, A.K. and Schooling, J.M. (2016) Effects of Joint Rotational Stiffness on Structural Responses of Multi-Story Modular Buildings. *Transforming the Future of Infrastructure through Smarter Information:*

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction, ICE publishing, 457–462. https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/tfitsi.61279.457

37 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2020) Effect of Inter-Module Connection Stiffness on Structural Response of a Modular Steel Building Subjected to Wind and Earthquake Load. *Engineering Structures*, Elsevier, **213**, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110628

38 Deng, E.F., Zong, L., Ding, Y., Dai, X.M., Lou, N. and Chen, Y. (2018) Monotonic and Cyclic Response of Bolted Connections with Welded Cover Plate for Modular Steel Construction. *Engineering Structures*, Elsevier, **167**, 407–419. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.028

39 Deng, E.F., Zong, L., Ding, Y. and Luo, Y.B. (2018) Seismic Behavior and Design of Cruciform Bolted Module-to-Module Connection with Various Reinforcing Details. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd, **133**, 106–119. https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.09.033

40 Qiu, C., Ding, C., He, X., Zhang, L. and Bai, Y. (2018) Axial Performance of Steel Splice Connection for Tubular FRP Column Members. *Composite Structures*, Elsevier, **189**, 498–509. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.100

41 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2021) New Interlocking Inter-Module Connection for Modular Steel Buildings: Simplified Structural Behaviours. *Engineering Structures*, Elsevier, **227**, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111409

42 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2021) Lateral Behaviour of Modular Steel Building with Simplified Models of New Inter-Module Connections. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **236**, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112103

43 Sendanayake, S. V., Thambiratnam, D.P., Perera, N., Chan, T. and Aghdamy, S. (2019) Seismic Mitigation of Steel Modular Building Structures through Innovative Inter-Modular Connections. *Heliyon*, Elsevier Ltd, **5**, e02751. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02751

44 Wang, Y., Xia, J., Ma, R., Xu, B. and Wang, T. (2019) Experimental Study on the Flexural Behavior of an Innovative Modular Steel Building Connection with Installed Bolts in the Columns. *Applied Sciences*, **9**, 1–16. https://doi.org/10.3390/app9173468

45 Bazarchi, E., Davaran, A., Lamarche, C.P., Roy, N. and Parent, S. (2023) Experimental and Numerical Investigation of a Novel Vertically Unconstrained Steel Inter-Modular Connection. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd., **183**, 1–26. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110364

46 Liew, J.Y.R. (2018) Innovation in Modular Building Construction. *9th International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS 2018)*, The Hong Kong Institute of Steel Construction. https://doi.org/10.18057/ICASS2018.K.05

47 Choi, K.-S., Lee, H.-C. and Kim, H.-J. (2016) Influence of Analytical Models on the Seismic Response of Modular Structures. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, **20**, 74–85. https://doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.2.074

48 Park, K.S., Moon, J., Lee, S.S., Bae, K.W. and Roeder, C.W. (2016) Embedded Steel Column-to-Foundation Connection for a Modular Structural System. *Engineering Structures*, Elsevier, **110**, 244–257. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.034

49 Pang, S.D., Liew, J.Y.R.L., Dai, Z. and Wang, Y. (2016) Prefabricated Prefinished Volumetric Construction Joining Techniques Review. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings, 249–256. https://doi.org/10.29173/mocs31

50 Chen, Z., Liu, J. and Yu, Y. (2017) Experimental Study on Interior Connections in Modular Steel Buildings. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **147**, 625–638. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.002

51 Chen, Z., Liu, J., Yu, Y., Zhou, C. and Yan, R. (2017) Experimental Study of an Innovative Modular Steel Building Connection. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, **139**, 69–82. https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2017.09.008

52 Deng, E.F., Yan, J.B., Ding, Y., Zong, L., Li, Z.X. and Dai, X.M. (2017) Analytical and Numerical Studies on Steel Columns with Novel Connections in Modular Construction. *International Journal of Steel Structures*, **17**, 1613–1626. https://doi.org/10.1007/s13296-017-1226-5

53 Lee, S., Park, J., Kwak, E., Shon, S., Kang, C. and Choi, H. (2017) Verification of the Seismic Performance of a Rigidly Connected Modular System Depending on the Shape and Size of the Ceiling Bracket. *Materials*, **10**, 1–16. https://doi.org/10.3390/ma10030263

54 Lee, S., Park, J., Shon, S. and Kang, C. (2018) Seismic Performance Evaluation of the Ceiling-Bracket-Type Modular Joint with Various Bracket Parameters. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **150**, 298–325. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.08.008

55 Lee, S.S. (2021) Finite Element Modeling of Bolted Inter-Module Connections in Modular Steel

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Buildings. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, **33**, 347–354. https://doi.org/10.7781/kjoss.2021.33.6.347

56 Cho, B.H., Lee, J.S., Kim, H. and Kim, D.J. (2019) Structural Performance of a New Blind-Bolted Frame Modular Beam-Column Connection under Lateral Loading. *Applied Sciences (Switzerland)*, **9**, 1–21. https://doi.org/10.3390/app9091929

57 Khan, K. and Yan, J.B. (2020) Finite Element Analysis on Seismic Behaviour of Novel Joint in Prefabricated Modular Steel Building. *International Journal of Steel Structures*, Korean Society of Steel Construction, **20**, 752–765. https://doi.org/10.1007/s13296-020-00320-w

58 Ma, R., Xia, J., Chang, H., Xu, B. and Zhang, L. (2021) Experimental and Numerical Investigation of Mechanical Properties on Novel Modular Connections with Superimposed Beams. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **232**, 1–26. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111858

59 Xu, B., Xia, J., Chang, H., Ma, R. and Zhang, L. (2020) Flexural Behaviour of Pairs of Laminated Unequal Channel Beams with Different Interfacial Connections in Corner-Supported Modular Steel Buildings. *Thin-Walled Structures*, **154**, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106792

60 Xu, B., Xia, J., Chang, H., Ma, R. and Zhang, L. (2022) Experimental and Numerical Investigation on the Lateral Force Resistance of Modular Steel Sub-Frames with Laminated Double Beam. *Journal of Building Engineering*, **46**, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103666

61 Xu, B., Xia, J., Chang, H., Ma, R. and Zhang, L. (2022) Evaluation of Superimposed Bending Behaviour of Laminated Channel Beams in Modular Steel Buildings Subjected to Lateral Load. *Thin-Walled Structures*, **175**, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109234

62 Lyu, Y.-F., Li, G.-Q., Cao, K., Zhai, S.-Y., Li, H., Chen, C. and Wang, Y.-Z. (2021) Behavior of Splice Connection during Transfer of Vertical Load in Full-Scale Corner-Supported Modular Building. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **230**, 1–17. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111698

63 Lyu, Y.-F., Li, G.-Q., Cao, K., Zhai, S.-Y., Wang, Y.-B., Mao, L. and Ran, M. (2022) Bending Behavior of Splice Connection for Corner-Supported Steel Modular Buildings. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **250**, 1–17. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113460

64 Zhai, S.-Y., Lyu, Y.-F., Cao, K., Li, G.-Q., Wang, W.-Y. and Chen, C. (2022) Experimental Study on Bolted-Cover Plate Corner Connections for Column-Supported Modular Steel Buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **189**, 1–23. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107060

65 Cao, K., Zhai, S.Y., Lyu, Y.F., Li, G.Q., Wang, W.Y. and Chen, C. (2024) Working Mechanism Evaluations of Full-Scale Joints with Bolted-Cover Plate Connection for Modular Steel Buildings. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd, **199**, 1–21. https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111772

66 Nadeem, G., Safiee, N.A., Abu Bakar, N., Abd Karim, I. and Mohd Nasir, N.A. (2021) Finite Element Analysis of Proposed Self-Locking Joint for Modular Steel Structures. *Applied Sciences (Switzerland)*, **11**, 1–20. https://doi.org/10.3390/app11199277

67 Nadeem, G., Safiee, N.A., Bakar, N.A., Karim, I.A. and Nasir, N.A.M. (2022) Evaluation of Slip Behaviour of Self-Locking Modular Steel Connection. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **197**, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107467

68 Bowron, J. (2023) Locating Pin Assembly for a Modular Frame. US Patent 2023/0383520 A1, United States. https://patents.google.com/patent/US20230383520A1/en

69 Ding, Y., Deng, E., Zong, L., Dai, X., Li, Y., Wang, H. and Bi, J. (2019) State-of-the-Art on Connection in Modular Steel Construction. *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures*, Science Press, **40**, 33–40. https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.03.003

70 Dhanapal, J., Ghaednia, H., Das, S. and Velocci, J. (2019) Structural Performance of State-of-the-Art VectorBloc Modular Connector under Axial Loads. *Engineering Structures*, Elsevier, **183**, 496–509. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.023

71 Hajimohammadi, B., Das, S., Ghaednia, H. and Dhanapal, J. (2024) VectorBloc Column Connections under Tension: Experimental and Numerical Studies. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **221**, 2–9. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108922

72 Shi, F., Wang, H., Zong, L., Ding, Y. and Su, J. (2020) Seismic Behavior of High-Rise Modular Steel Constructions with Various Module Layouts. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **31**, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101396

73 Hu, Q., Lin, B., Xie, Y. and Chen, W. (2020) Study on Mechanical Performance of Connection Jointsin Novel Modular Steel Structure Buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **605**. https://doi.org/10.1088/1755-1315/605/1/012015

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

74 Lee, J.S., Lee, H. Du, Shin, K.J., Kim, H.J. and Lee, K.M. (2021) Structural Performance Evaluation of Modular Connections Using Developed Blocks. *International Journal of Steel Structures*, Korean Society of Steel Construction, **21**, 1250–1259. https://doi.org/10.1007/s13296-021-00500-2

75 Corfar, D.A. and Tsavdaridis, K.D. (2023) A Hybrid Inter-Module Connection for Steel Modular Building Systems with SMA and High-Damping Rubber Components. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **289**, 1–25. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116281

76 Shi, F.W., Ding, Y., Zong, L., Pan, W., Duan, Y. and Ping, T.Y. (2024) Seismic Behavior of High-Rise Modular Buildings with Simplified Models of Inter-Module Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **221**, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108867

77 Liu, J., Cao, X., Yan, S., Chen, Z., Liu, Y. and Lu, G. (2024) Research on Seismic Behavior of Tapered-Head Bolted Inter-Module Connection of Modular Steel Buildings. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **304**, 1–25. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117586

78 Dai, X.-M., Zong, L., Ding, Y. and Li, Z.-X. (2019) Experimental Study on Seismic Behavior of a Novel Plug-in Self-Lock Joint for Modular Steel Construction. *Engineering Structures*, Elsevier, **181**, 143–164. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.075

79 Chen, Z., Liu, Y., Zhong, X. and Liu, J. (2019) Rotational Stiffness of Inter-Module Connection in Mid-Rise Modular Steel Buildings. *Engineering Structures*, Elsevier, **196**, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.06.009

80 Liu, Y., Chen, Z., Liu, J., Bai, Y., Zhong, X. and Wang, X. (2020) Lateral Stiffness Evaluation on Corner-Supported Thin Walled Modular Steel Structures. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd, **157**, 18. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106967

81 Fernando, S., Gad, E., Hashemi, M.J., Rajeev, P., Srisangeerthanan, S., Lam, N., Godbole, S. and Mafas, M. (2019) Development and Optimisation of Low-Carbon, Affordable, Medium-Rise Modular Structural System Using Innovative Connections. *Cooperative Research for Low Carbon Living*, Cooperative Research for Low Carbon Living, Melbourne, 1–50. https://apo.org.au/node/242941

82 Dai, Z., Cheong, T.Y.C., Pang, S.D. and Liew, J.Y.R. (2021) Experimental Study of Grouted Sleeve Connections under Bending for Steel Modular Buildings. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **243**, 1–22. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112614

83 Liu, J., Chen, Z. and Wang, J. (2020) Sliding Block Type Modular Building Self-Locking Connection Node. CN Patent 111,287,331 A, China. https://patents.google.com/patent/CN111287331A/en

84 Khan, K., Chen, Z., Liu, X., Yan, J.B. and Liu, J. (2023) Development of Novel Sigma-Shaped Self-Locking Inter-Modular Joints for Robust Modular Steel Buildings. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 491–505. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7331-4_40

85 Yang, N., Xia, J., Chang, H., Zhang, L. and Yang, H. (2023) A Novel Plug-in Self-Locking Inter-Module Connection for Modular Steel Buildings. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd., **187**, 1–17. https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110774

86 Yang, N., Xia, J., Chang, H. and Zhang, L. (2024) The Flexural Mechanical Response of a Novel Plug-in Self-Locking Inter-Module Connection for Modular Steel Buildings. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **308**, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118008

87 Chen, Z., Li, H., Chen, A., Yu, Y. and Wang, H. (2017) Research on Pretensioned Modular Frame Test and Simulations. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **151**, 774–787. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.019

88 Fransworth, D. (2016) Modular Building Unit Connection System. US Patent 9,366,020 B2, United States. https://patents.google.com/patent/US9366020B2/en

89 Yu, Y., Chen, Z. and Chen, A. (2019) Experimental Study of a Pretensioned Connection for Modular Buildings. *Steel and Composite Structures*, **31**, 217–232. https://doi.org/10.12989/scs.2019.31.3.217

90 Liew, J.Y.R., Chua, Y.S. and Dai, Z. (2019) Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-Rise Buildings. *Structures*, Elsevier, **21**, 135–149. https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2019.02.010

91 Chua, Y.S., Liew, J.Y.R. and Pang, S.D. (2020) Modelling of Connections and Lateral Behavior of High-Rise Modular Steel Buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, **166**, 1–17. https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2019.105901

92 Chua, Y.S., Pang, S.D., Liew, J.Y.R. and Dai, Z. (2022) Robustness of Inter-Module Connections

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

and Steel Modular Buildings under Column Loss Scenarios. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **47**, 23. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103888

93 Sanches, R., Mercan, O. and Roberts, B. (2018) Experimental Investigations of Vertical Post-Tensioned Connection for Modular Steel Structures. *Engineering Structures*, Elsevier, **175**, 776–789. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.049

94 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H., Bi, K. and Tallowin, F.J. (2019) Shear Behaviour of Post-Tensioned Inter-Module Connection for Modular Steel Buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, **162**, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105707

95 Lee, K., Rasmussen, K.J.R. and Cho, B.H. (2024) Bolt-Free Post-Tensioned Connection for Steel-Framed Modular Buildings and Design for Optimal Preloading. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **218**, 1–31. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108703