

# ДАННЫЕ ПО ИНОСТРАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ ЛСТК НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ



АРСС

---

Ассоциация развития  
стального строительства

## АННОТАЦИЯ К ПЕРЕВОДНОМУ ИЗДАНИЮ ПО ОГНЕСТОЙКОСТИ

Технический отчет результатов научно-исследовательского проекта «Calculation rules of lightweight steel sections in fire situations», посвященный изучению огнестойкости несущих и ограждающих конструкций из стальных холодногнутых профилей, был выбран АРСС для перевода в поддержку и развитие СТО «Огнестойкость строительных конструкций из стальных холодногнутых оцинкованных профилей».

Над проектом «Calculation rules of lightweight steel sections in fire situations» работали ведущие ученые Франции, Англии, Италии и Испании, а также Швеции и Финляндии. В ходе исследования были проведены экспериментальные и численные исследования огнестойкости конструкций из стальных холодногнутых профилей. Целями данной исследовательской работы было: расширить понимание противопожарных характеристик каркасных конструкций из ЛСТК для повышения эффективности проектирования; оценить влияние обшивок на поведение каркасно-обшивных конструкций при пожаре; разработать численные аналитические методы расчета, способные прогнозировать поведение лстк без нагрузки и под нагрузкой в условиях огневого воздействия; разработать правила проектирования, которые могут быть использованы на практике и которые согласованы по всей Европе для внедрения в европейские стандарты.

Аналогичную работу с такими же целями и задачами проводила АРСС при разработке СТО АРСС «Огнестойкость строительных конструкций из стальных холодногнутых оцинкованных профилей». Важно и полезно изучить опыт и сравнить результаты, полученные иностранными коллегами.

Для перевода были выбраны главы, посвященные вопросам огнестойкости несущих стен, перекрытий и узлов их сопряжения, которые представляют наибольшую ценность в рамках СТО АРСС, и которые несомненно будут полезны российским проектировщикам и строителям и всем интересующимся ЛСТК.

---

### 3. ДАННЫЕ ПО ИНОСТРАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ ЛСТК НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ

#### 3.1 ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Механические характеристики легких стальных каркасов при комнатной температуре были изучены с целью их сравнения с механическими характеристиками в предельном состоянии по огнестойкости. В предельном состоянии по огнестойкости, как правило, принимают существующие параметры расчета температуры окружающей среды и изменяют их с учетом характеристик при высоких температурах. Следовательно, важно полностью уяснить правила расчета температуры окружающей среды, поскольку они лежат в основе правил расчета предельного состояния по огнестойкости. Характеристики легких стальных каркасов исследовали путем статических испытаний, численного моделирования и прямого сравнения с существующими процедурами проектирования.

#### 3.2 ПРОГРАММА СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Программа статических испытаний разделена на три части и тесно взаимосвязана с программой испытаний на огнестойкость. Первая часть программы включала несколько испытаний коротких стоек, проведенных компанией «VTT», для каждого размера профилей с целью определения эффективной площади профиля. Вторая часть программы включала несколько контрольных испытаний, проведенных в компании Corus на спаренных стойках, поддерживаемых конструкциями из гипсокартона, при различных условиях нагружения. Третья часть также включала контрольные испытания, проведенные в компании Corus, а именно испытания конструкций с двумя перекрытиями/стенными панелями с целью изучения эффекта практической передачи нагрузок в более приближенной к реальным условиям конструктивной схеме.

Размеры сечений профилей, испытанных в рамках программы, приведены в таблице 3-1. Профили малого сечения имели технологические отверстия диаметром 32 мм, расположенные с шагом 500 мм. Профили AWS имели стенки со сдвигом, которые увеличивали ширину профиля до 90 мм на некоторых участках, и в которых были проделаны отверстия. Профиль TC150 представлял собой C-образный профиль с перфорированной стенкой.

Профиль	Марка стали	Поставщик	Номинальные размеры
Малого размера	280 МПа	Lafarge (Франция)	100 x 50 x 0,6
Среднего размера	350 МПа	Metsec (Великобритания)	150 x 57 x 1,2
Большого размера	350 МПа	Rautaruukki Oy (Финляндия)	250 x 80 x 2,5
AWS	350 МПа	Rautaruukki Oy (Финляндия)	150 x 50/90 x 1,2
TC150	350 МПа	Rautaruukki Oy (Финляндия)	150 x 50 x 1,2

Таблица 3-1. Размеры сечений профилей, испытываемых в рамках программы испытаний

##### 3.2.1 Испытания коротких стоек

В первую часть программы входят 6 тестов для сечений профилей, испытываемых в рамках программы испытаний. Подробные данные об испытанных образцах приведены в таблице 3-2 (столбец «Результаты») и не дублируются в этом пункте.

##### 3.2.2 Испытания спаренных стоек

В рамках второй части программы испытаний было выполнено 22 испытания. Все испытанные образцы имели длину 2,85 м и состояли из спаренных стоек с расстоянием между стойками 600 мм, поддерживаемых конструкциями из гипсокартона.

Программа испытаний была разделена на несколько этапов. Этапы программы испытаний:

- испытания высоких стоек без опоры;
- испытания с различными условиями закрепления, с целью проверки элементов в приближенных к реальным условиям опирания;
- испытания на внецентренное нагружение с целью изучения эффекта от воздействия центрально и внецентренно приложенной нагрузки;
- испытания профилей, поддерживаемых конструкциями из гипсокартона только с одной стороны;
- испытания профилей, поддерживаемых конструкциями из гипсокартона и стальных листов.

Подробные данные об образцах, испытанных на каждом этапе, приведены в таблицах с 3-3 по 3-7 (столбец «Результаты») и не дублируются в этом пункте.

### 3.2.3 Испытания сборной конструкции «перекрытие-стена»

Третья часть программы испытаний включала испытания для исследования воздействия приложенных нагрузок на стены путем создания реалистичных моделей сборных конструкций «перекрытие-стена» и проведения контрольных испытаний при комнатной температуре для сравнения с результатами испытаний той же сборной конструкции на огнестойкость. Исследуемая сборная конструкция представлена в схематическом виде на рисунке 3-1. Профили стен и перекрытий имели ширину 3,0 м, и каждый из них состоял из шести секций с шагом ~ 600мм.

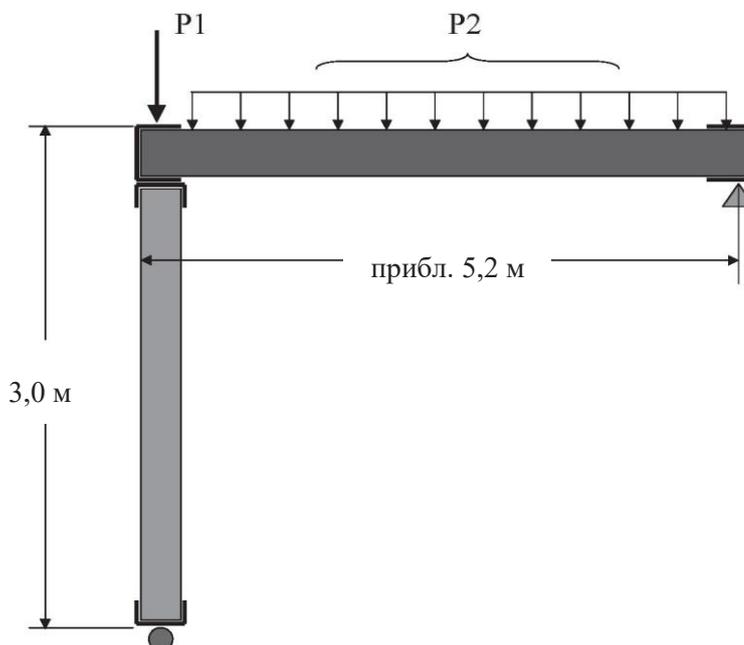


Рисунок 3-1. Установка для испытаний сборной конструкции «перекрытие-стена»

Статическая нагрузка, приложенная к конструкции (P2), соответствовала эксплуатационной нагрузке на конструкцию перекрытия. Нагрузка прилагалась за счет собственного веса грузов, подвешенных под перекрытием. После этого стойки стены испытывались на разрушение путем приложения нагрузки (P1) через четыре домкрата.

## 3.3 МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

### 3.3.1 Испытания коротких стоек

Испытания коротких стоек проводились согласно инструкциям, приведенным в Еврокоде 3: проектирование стальных конструкций. Часть 1-3: общие правила. Дополнительные правила для холодногнутых элементов и профилированных листов, и стандарта AISI «Спецификация расчета коэффициента нагрузки и сопротивления для элементов конструкций из холодногнутой стали» (1996).

Длины испытываемых образцов для каждого испытания были приняты с учетом того, чтобы общая потеря устойчивости не имела возможности влиять на снижение сопротивления, но при этом, чтобы можно было обнаруживать повреждения вследствие смятия при деформации. Высота профилей малого и среднего сечения составляла 600 мм, а профилей большого сечения и профилей AWS — 1000 мм. Торцы образцов подвергались механической обработке, выполнена подрезка для обеспечения полного контакта концов образца в испытательной установке. Оба конца образца были усилены деревянным брусом, чтобы исключить их местное смятие до достижения предельного сопротивления поперечного сечения в процессе испытания (см. рисунок 3-2 ниже).

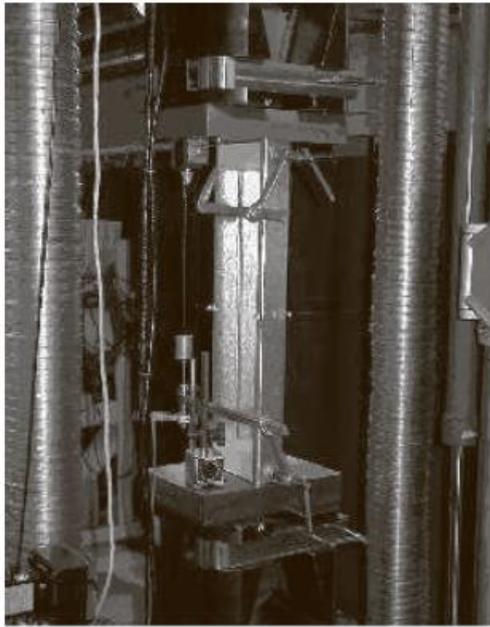


Рисунок 3-2. Установка для испытаний коротких стоек

### **3.3.2 Испытания спаренных стоек**

Каждый испытываемый образец помещался в испытательную установку, показанную на рисунке 3-3. Каждую стойку помещали в испытательную установку и регулировали до вертикального положения в обоих направлениях. После этого гипсокартон (в случае его участия в эксперименте) крепился к соответствующим образцам с сохранением требуемого расстояния шага между винтами.



Рисунок 3-3. Образец в испытательной установке

Внешний вид испытательной установки показан на рисунке 3-4. Боковые смещения измеряли в середине и в точках на расстоянии одной четверти длины каждой стойки (рисунок 3-5). Нагрузку прикладывали через два домкрата, расположенных в верхней части испытательной установки. Испытания продолжали до тех пор, пока образец не переставал выдерживать нагрузку.



Рисунок 3-4. Внешний вид испытательной установки



Рисунок 3-5. Внешний вид устройств измерения боковых смещений

### **3.3.3 Испытания сборной конструкции «перекрытие-стена»**

Статическая нагрузка, приложенная к конструкции (P2), соответствовала эксплуатационной нагрузке на конструкцию. Нагрузка прилагалась за счет собственного веса грузов, подвешенных под перекрытием. Суммарную нагрузку 60,0 кН прикладывали в шести точках, равномерно расположенных вдоль четырех центральных балок системы перекрытий. Общая нагрузка на каждую балку составляет 15 кН. После этого четыре центральные стойки стены испытывались на разрушение путем приложения нагрузки через систему домкратов. Во время испытания контролировали центральные боковые изгибные смещения четырех центральных стоек стены.

Внешний вид испытательного несущего каркаса, изготовленного для испытаний сборной конструкции «перекрытие-стена», приведен на рисунке 3-6. На рисунке 3-7 представлен более детальный вид системы приложения нагрузки, используемой для загрузки эксплуатационной нагрузки перекрытия.



Рисунок 3-6. Внешний вид установки для испытаний сборной конструкции «перекрытие-стена»



Рисунок 3-7. Детальный вид системы приложения нагрузки на конструкцию пола

### 3.4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

#### 3.4.1 Испытания коротких стоек

Результаты серии испытаний представлены в таблице 3-2. Профиль среднего размера (150x57 x12/1,2) также проходил испытания с шарнирным опиранием на концах и имел технологическое отверстие в центре.

Испытание	Стойка	Длина	$N_{\text{тест.}}$	Примечания
		(мм)	(кН)	
1	C100 x 50 x 6/0,6	600	8,6	
2	C150 x 57 x 12/1,2	600	59,6	
3		600	67,4	С технологическим отверстием в центре
4		600	60,9	С шарнирно закрепленными концами
5	C250 x 80 x 22/2,5	1000	195,5	
6	AWS 150/1,2	1000	74,1	

Таблица 3-2. Сводные результаты испытаний коротких стоек

Все С-образные образцы разрушились вследствие потери устойчивости при деформации, которому предшествовала локальная потеря устойчивости. Использование граничных условий для образцов с плоским концом по сравнению с граничными условиями для шарнирно опертых образцов во время испытаний на огнестойкость не влияет ни на характеристики, ни на разрушающую нагрузку. Результаты, полученные для стойки среднего размера с технологическим отверстием, очень интересны в том, что отверстие в стенке, по-видимому, усиливает профиль. Местная и общая потеря устойчивости не совпадают на одной длине волны из-за имеющегося отверстия. Максимальная устойчивость пластины передается выше и ниже средней высоты. Следовательно, вращательная опора стенки на усиленный фланец не уменьшается после деформаций при местной потере устойчивости, как у элементов без отверстий. Кроме того, профиль стойки AWS разрушился из-за продольного изгиба при деформации. Из-за формы стойки AWS потеря устойчивости при деформации также является критическим режимом разрушения при увеличении длины образца. Внешний вид окончательной формы образцов после продольного изгиба показан на рисунке 3-8.

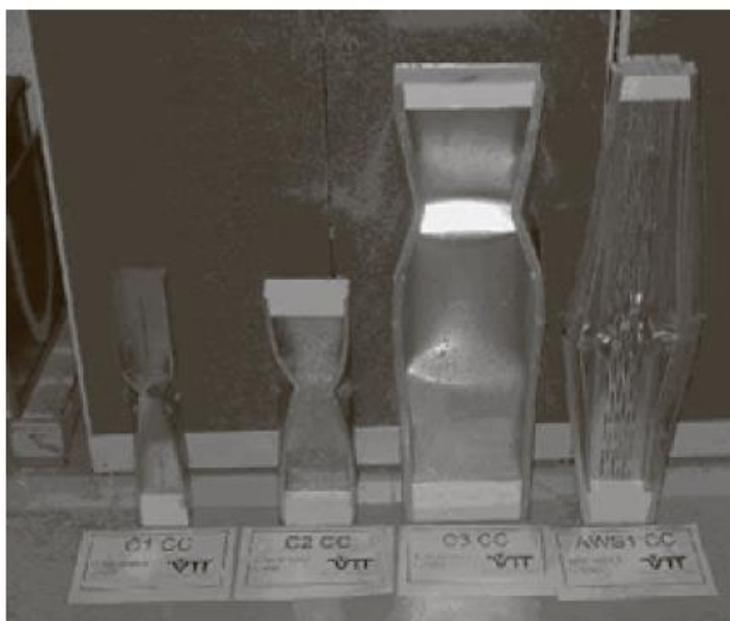


Рисунок 3-8. Модели разрушения коротких стоек

### 3.4.2 Испытания спаренных стоек

В рамках второй части программы испытаний каждая серия испытаний проводилась для определения конкретного аспекта характеристик холодногнутых профилей и того, каким образом они поддерживаются ненесущими элементами. Во время каждого испытания могут возникать несколько основных режимов разрушения. Эти режимы разрушения можно разделить на местные и общие режимы разрушения. Местные режимы разрушения холодногнутых С-образных профилей с общей отогнутой кромкой, испытанных в рамках настоящего исследования, показаны на рисунке 3-9, а общие режимы разрушения представлены на рисунке 3-10. Тип режима разрушения будет определяться для каждого испытания. Следует отметить, что одновременно могут быть общие и местные режимы разрушения.

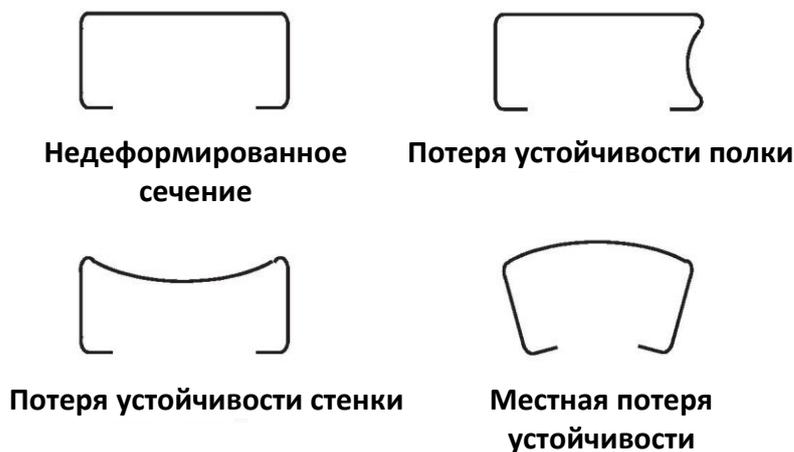


Рисунок 3-9. Основные виды потери устойчивости профиля — локальные



Рисунок 3-10. Основные режимы разрушения — общие

#### 3.4.2.1 Испытания длинных стоек

Испытания высоких стоек проводились для отдельных элементов без опор на концах, аналогичных условиям основных испытаний гипсокартона. В этом случае было решено использовать точно такую же испытательную установку и концевые опоры, которые применялись в основной серии испытаний. Это означало, что одновременно испытывались два образца.

Результаты серии испытаний приведены в таблице 3-3. Число в скобках — это номер испытания. В целом можно отметить, что результаты зависят от размеров и толщины сечения. Полученные результаты необходимо сравнить с результатами более поздних испытаний, чтобы рассмотреть их в перспективе, и они будут рассмотрены в пунктах ниже.

Размер и тип профилей				Условия испытаний			
Малого размера (100x50x0,6)	Среднего размера (150x57x1,2)	Большого размера (250x80x2,5)	AWS (150x1,2)	Нагрузка		Тип профиля	
				В центр	С эксцентриситетом (0,25 от высоты сечения)	Без отверстий	С отверстиями
280 МПа	350 МПа	350 МПа	350 МПа				
6,1 кН(18)	50,8 кН(19)	177,0 кН(22)	-	√		√	
-	-	-	46,5 кН(20)	√			√
-	-	-	48,6 кН(21)		√		√

Таблица 3-3. Сводные данные по результатам испытаний высоких стоек

Режимы разрушения профилей среднего размера и большого размера сравниваются на рисунке 3-11, режимы разрушения профиля AWS при воздействии нагрузки приложенной в центр сечения и с эксцентриситетом — на рисунке 3-12. Как следует из рисунков, общим режимом разрушения во время каждого испытания являлся общая изгибно-крутильная потеря устойчивости. Она была вызвана местной потерей устойчивости стенки образца вблизи центра выступов С-образных профилей с отогнутой кромкой и некоторым местным режимом продольного изгиба при деформации в профилях AWS. Ожидалось, что профиль AWS при приложении нагрузки с эксцентриситетом обеспечит более низкую разрушающую нагрузку, чем в условиях с нагрузкой приложенной в центр сечения, но, как показано на рисунке 3-12, общие режимы очень похожи, поэтому можно предположить, что общий продольный изгиб преобладает перед изгибающим моментом из-за того, что эксцентриситет не оказывает какого-либо воздействия.



Профиль среднего размера — разрушение = 50,8 кН  
Профиль большого размера — разрушение = 177 кН

Рисунок 3-11. Сравнение режимов разрушения профилей среднего размера и большого размера во время испытаний высоких стоек



Центрально нагруженная — разрушение = 46,5 кН    Внецентренно нагруженная — разрушение = 48,6 кН  
 Рисунок 3-12. Сравнение результатов испытаний профилей AWS высоких стоек под воздействием нагрузки приложенной в центр сечения и нагрузки приложенной с эксцентриситетом

### 3.4.2.2 Испытания с различными условиями закрепления

В самом начале проекта было установлено, что стандартный метод закрепления опор несущих стоек в направляющих может привести к погрешностям результатов испытаний. Приняли решение испытать большинство образцов при идеальных условиях опирания стоек, чтобы гарантировать постоянные характеристики во время разных испытаний. Такие условия опирания предполагали наличие тяжелых плит и швеллеров, которые крепили к домкратам в верхней части образцов и шарнирно опирали в нижней части образца (рисунки 3-3 и 3-4). Настоящая программа испытаний была составлена таким образом, чтобы можно было изучить точное воздействие фактических условий опирания на характер работы профилей. В ходе первого испытания стойки просто вставляли в направляющие швеллеров, образец помещали в испытательную установку, и с каждой стороны стоек устанавливали двойные плиты, после чего образец подвергался испытанию. Второе испытание было аналогично первому, но в этом случае стойки крепили одним винтом к направляющей швеллера. Третье испытание проходило без направляющей в идеальных граничных условиях.

Максимальные нагрузки во время каждого из этих испытаний приведены в таблице 3-4. Кривые изгиба под нагрузкой сравниваются на рисунке 3-13. Очевидно, что наличие направляющих оказывает некоторое воздействие на характер изгиба под нагрузкой. Наличие направляющих также, по-видимому, влияет на максимальную разрушающую нагрузку, так как оба испытания завершились неудачей при более низкой нагрузке, чем воздействовала на образец в идеальных граничных условиях. Причина четко показана на рисунке 3-14. Оба контролируемых образца разрушаются из-за очень локализованной потери устойчивости у самого конца образца, тогда как образец с идеальной опорой разрушается из-за местной потери устойчивости опоры на конце образца, но действует при этом полную несущую способность профиля из-за более эффективной опоры на конце образца на тяжелую плиту и швеллеры. В этом случае местная потеря устойчивости направлена к одной полке из-за внецентренного приложения нагрузки во время данных испытаний. Можно сделать вывод, что идеальные условия закрепления концов лучше, так как нас в основном интересует общее разрушение профиля, а не очень локализованные разрушения у концов, наблюдающиеся во время испытаний с направляющими швеллеров.

Размер и тип профилей				Условия испытаний	
Малого размера (100x50x0,6)	Среднего размера (150x57x1,2)	Большого размера (250x80 x2,5)	AWS (150x1,2)	Нагрузка	Тип профиля
280 МПа	350 МПа	350 МПа	350 МПа	С эксцентриситетом (0,25 от высоты сечения)	Условия закрепления концов
-	36,6 кН (1)	-	-	√	Стойки просто вставлены в направляющие швеллеров
-	49,6 кН (2)	-	-	√	Стойки в направляющих швеллеров закреплены винтами
-	54,9 кН (3)	-	-	√	Один конец закреплен/второй конец имеет шарнирную опору

Таблица 3-4. Сводные данные по результатам испытаний с различными условиями закрепления концов

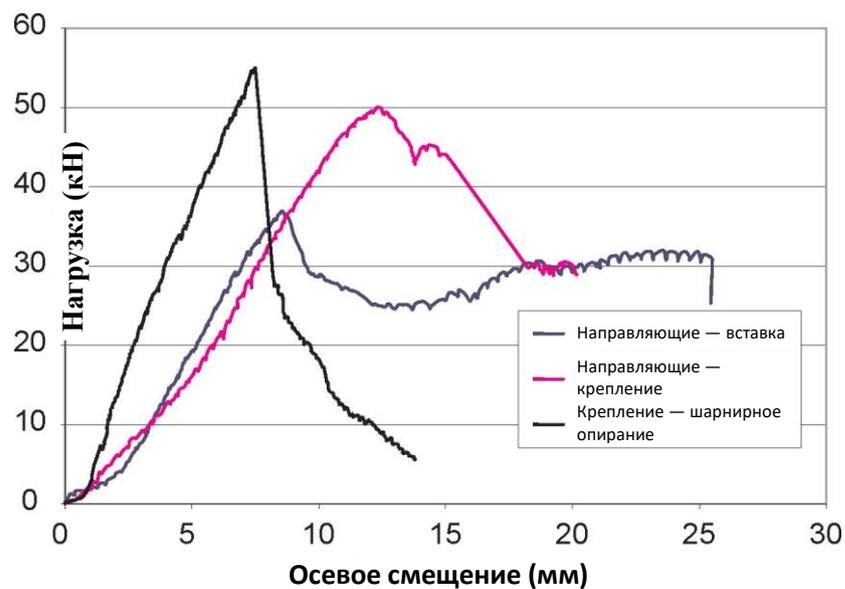


Рисунок 3-13. Сравнение кривых изгиба под нагрузкой для образцов с различными условиями закрепления



Вставка в направляющие — разрушение = 36,6 кН



Крепление в направляющих — разрушение = 49,6 кН



Крепление у домкрата/шарнирное опирание в нижней части — разрушение = 54,9 кН

Рисунок 3-14. Сравнение режимов разрушения образцов с различными условиями закрепления

### 3.4.2.3 Испытания на эксцентриситет приложения нагрузки

Эта серия испытаний была разработана для количественной оценки влияния приложения нагрузки с эксцентриситетом ко всем испытываемым профилям. Перед этими испытаниями двойные плиты прикручивались самонарезающими винтами с шагом примерно 300 мм. В ходе этой серии испытаний был проверены все участвующие сечения.

Максимальные нагрузки во время каждого из этих испытаний приведены в таблице 3-5. В процессе каждого испытания были четко различимы признаки местной потери устойчивости стенки, при этом образец оставался гибким (рисунок 3-15). После достижения предела устойчивости профиля к местным пределам устойчивости образец больше не может выдерживать нагрузку и считается разрушившимся. Воздействие эксцентриситета заключалось в уменьшении разрушающей нагрузки всех образцов из-за ожидаемого дополнительного изгибающего момента. Также в серию испытаний входило дополнительное испытание 24 (\*), выполняемое на профиле TC150.

Размер и тип профилей				Условия испытаний			
Малого размера (100x50x0,6)	Среднего размера (150x57x1,2)	Большого размера (250x80x2,5)	AWS (150 x 1,2)	Нагрузка		Тип профиля	
				В центр	С эксцентриситетом (0,25 от высоты сечения)	Без отверстий	С отверстиями
280 МПа	350 МПа	350 МПа	350 МПа				
9,9 кН (8)	74,4 кН (4)	223,0 кН (15)	-	√		√	
-	-	-	95,1 кН (11)	√			√
7,2 кН (9)	54,9 кН (5)	168,5 кН (16)	-		√	√	
-	-	-	57,5 кН (12)		√		√
-	-	-	45,6 кН (24)*		√		√

Таблица 3-5. Сводные данные по результатам испытаний на эксцентриситет приложения нагрузки



Рисунок 3-15. Стандартные местные потери устойчивости стенки образца

Разница в характеристиках потери местной устойчивости образцов С-образных профилей с отогнутой кромкой под воздействием центрально и внецентренно приложенных нагрузок показана на рисунках 3-16 и 3-17. Образцы под нагрузкой приложенной в центр сечения имеют потери местной устойчивости на всем профиле, а образцы под воздействием нагрузки приложенной с эксцентриситетом — имеют местные потери устойчивости полки, расположенные ближе всего к точке приложения внецентренной нагрузки. В каждом случае местные потери устойчивости возникают между последним набором винтов, ближайшим к точке приложения нагрузки, или, чаще, к точке опоры. Режимы разрушения, выявленные в ходе испытаний профиля AWS (рисунок 3-18), немного отличаются в том смысле, что разрушения распространяются вдоль большей части образца. Это означает, что часть профиля в которой возникают местные потери устойчивости, как правило, проходит через точки винтовой опоры и захватывает стойки, протягивающие винты через гипсокартон. Испытания профилей AWS в целом были более сложными из-за разных точек опирания стоек у опоры вследствие того, что отверстия в стенке у конца были проделаны в разных местах. Также считается, что проделанные отверстия вызывают неустойчивость профиля у точки местной потери устойчивости, что приводит к сильно локализованным воздействиям, которые в свою очередь способствуют протягиванию винтов через гипсокартон. Эти проблемы показаны на рисунке 3-19.



Центрально нагруженный — разрушение = 74,4 кН    Внецентренно нагруженный — разрушение = 54,9 кН

Рисунок 3-16. Сравнение режимов разрушения центрально и внецентренно нагруженных образцов среднего размера, имеющих закрепление с обеих сторон



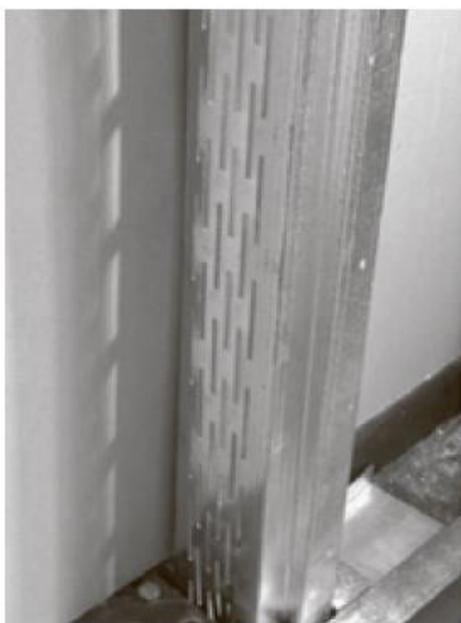
Центрально нагруженная — разрушение = 223 кН    Внецентренно нагруженная — разрушение = 168,5 кН

Рисунок 3-17. Сравнение режимов разрушения центрально и внецентренно нагруженных образцов большого размера, имеющих закрепление с обеих сторон

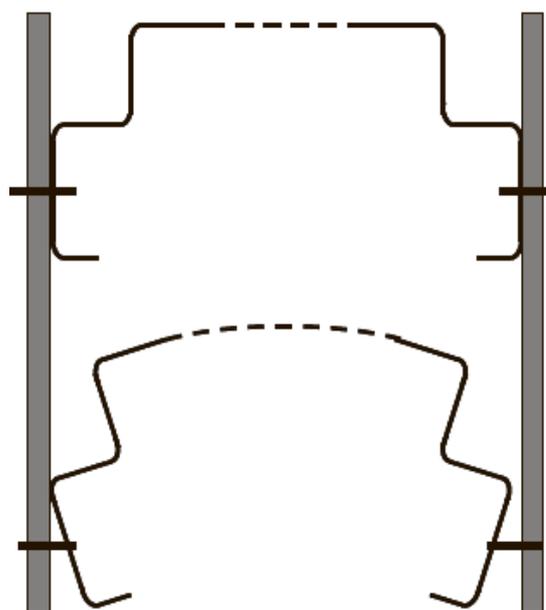


Центрально нагруженная — разрушение = 95.1 кН    Внецентренно нагруженная — разрушение = 57,5 кН

Рисунок 3-18. Сравнение режимов разрушения центрально и внецентренно нагруженных образцов AWS, имеющих опору с обеих сторон



Неравномерное опирание



Неустойчивость профиля из-за ослабленной стенки вызывает локализованные воздействия

Рисунок 3-19. Деформации при испытаниях образцов AWS

#### 3.4.2.4 Образцы раскрепленные (обшитые) конструкциями из гипсокартона только с одной стороны

Эта серия испытаний была разработана для проверки полок стоек без опоры. Такая компоновка является стандартной для внутренних перегородок, в которых стойки расположены в шахматном порядке в целях улучшения звукоизоляционных характеристик стен. Каждый образец был испытан с точкой эксцентриситета, расположенной ближе всего к полке стойки без опоры. Это наихудший случай как во время испытания на огнестойкость, когда прогиб из-за изгиба от температурного воздействия увеличивается вследствие дополнительного изгибающего момента, так и в ходе статического испытания из-за повышенной силы сжатия в полке элемента без опоры.

Максимальные нагрузки во время каждого из этих испытаний приведены в таблице 3-6. Как ожидается, эти нагрузки ниже нагрузок на стойки, поддерживаемые конструкциями из гипсокартона с обеих сторон. Дополнительное испытание было проведено для профиля среднего размера с эксцентриситетом на поддерживаемой гипсокартоном стороне. Фактический эксцентриситет в стене зависит от характера связи между стеной и любым поддерживаемым перекрытием или стеной над конкретной стеной. Во время этого испытания наблюдалась более высокая разрушающая нагрузка 57,4 кН, примерно равная нагрузке, определенной в ходе эквивалентного испытания (54,9 кН), когда стойка поддерживалась конструкциями из гипсокартона с двух сторон.

Размер и тип профилей				Условия испытаний			
Малого размера (100x50x0,6)	Среднего размера (150x57x1,2)	Большого размера (250x80x2,5)	AWS (150 x 1,2)	Нагрузка		Тип профиля	
				В центр	С эксцентриситетом (0,25 от высоты сечения)	Без отверстий	С отверстиями
280 МПа	350 МПа	350 МПа	350 МПа				
7,3 кН (10)	44,9 кН (6)	153,5 кН (17)	-		√	√	
-	-	-	43,2 кН (13)		√		√

Таблица 3-6. Сводные данные по результатам испытаний образцов, поддерживаемых только с одной стороны

Модели потери устойчивости во время испытаний образцов среднего размера и большого размера показаны на рисунке 3-20. Модели потери устойчивости для образцов среднего и большого размера, испытанных под нагрузкой приложенной с эксцентриситетом по отношению к стороне без опоры, представляют собой только модель с потерей местной устойчивости полки сечения, а не с потерей местной устойчивости стенки/всего профиля, наблюдаемых во время других испытаний. Это ожидается из-за повышенной силы сжатия в полке без опоры и демонстрирует роль, которую винты играют в подавлении модели потери местной устойчивости нижней полки сечения в ходе других испытаний. Сходство модели потери устойчивости для образца с нагрузкой на сторону с опорой с моделями предыдущих испытаний (сравните рисунки 3-16 и 3-20) также ясно иллюстрирует упомянутое выше. Модели потери устойчивости во время испытаний профилей AWS показаны на рисунке 3-21. Наблюдаются характер, аналогичный характеру во время испытаний С-образных профилей с отогнутой кромкой, т. е. потеря устойчивости сжатой полки.



Разрушение образцов большого размера = 154 кН



Разрушение образцов среднего размера = 44,9 кН



Разрушение образцов среднего размера = 57,4 кН

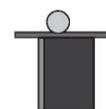
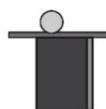


Рисунок 3-20. Сравнение разрушения профилей большого размера и среднего размера для образцов, поддерживаемых только с одной стороны



Разрушение профилей AWS = 43,2 кН

Рисунок 3-21. Модели разрушения профилей AWS для образцов, поддерживаемых только с одной стороны

### 3.4.2.5 Воздействие применения стальных листов

Время до разрушения при испытании на огнестойкость во многом зависит от механических характеристик гипсокартона. Если на стену оказывают воздействие высокие температуры, то основная функция гипсокартона заключается в защите конструктивных элементов стены за счет снижения скорости повышения температуры. Однако при стандартных испытаниях на огнестойкость одинарные стены из гипсокартона быстро растрескиваются при усадке. После формирования трещин горячие газы могут проникать в полость стены, сталь быстро нагревается, и вскоре происходит разрушение конструкции. Несмотря на то, что гипсокартон разрушается, большая часть плиты все еще выполняет свою функцию пожарозащиты. Именно по этой причине применяют двойные гипсокартонные плиты: первый слой гипсокартона трескается, но защищает второй слой гипсокартона, значительно увеличивая время до растрескивания этого слоя и, следовательно, время до разрушения всей стены. Были проведены испытания на огнестойкость гипсокартона со стальной защитой, чтобы проверить, гарантирует ли большая целостность конструкции, обеспечиваемая стальными листами, более продолжительную огнестойкость. Испытания проводились при комнатной температуре, чтобы обеспечить контрольные испытания характеристик данной системы при пожаре.

Максимальные нагрузки на профили среднего размера и профили AWS во время двух испытаний приведены в таблице 3-7. Согласно данным в таблице стальной лист очень незначительно влияет на максимальную нагрузку, полученную для профиля среднего размера — 57,9 кН по сравнению со значением 54,9 кН. Это связано с тем, что режимом разрушения по-прежнему является местная потеря устойчивости профиля рядом с концом образца. На рисунке 3-22 представлены одинаковые режимы разрушения в ходе обоих испытаний. Тем не менее, наблюдается значительный рост в максимальной нагрузке на профиль AWS — 70 кН по сравнению с 57,5 кН. Это обусловлено тем, что стальной лист снижает способность профиля AWS протягивать винты через гипсокартон. Таким образом, длина участка потери местной устойчивости сокращается, что увеличивает несущую способность профиля. Это четко показано на рисунке 3-23.

Размер и тип профилей				Условия испытаний			
Малого размера (100x50x0,6)	Среднего размера (150x57x1,2)	Большого размера (250x80x2,5)	AWS (150x1,2)	Нагрузка		Тип профиля	
				В центр	С эксцентриситетом (0,25 от высоты сечения)	Без отверстий	С отверстиями
280 МПа	350 МПа	350 МПа	350 МПа				
-	57,9 кН (7)	-	-		√	√	
-	-	-	70,0 кН (14)		√		√

Таблица 3-7. Сводные данные по результатам испытаний образцов с дополнительным стальным листом



Без листа — разрушение = 54,9 кН

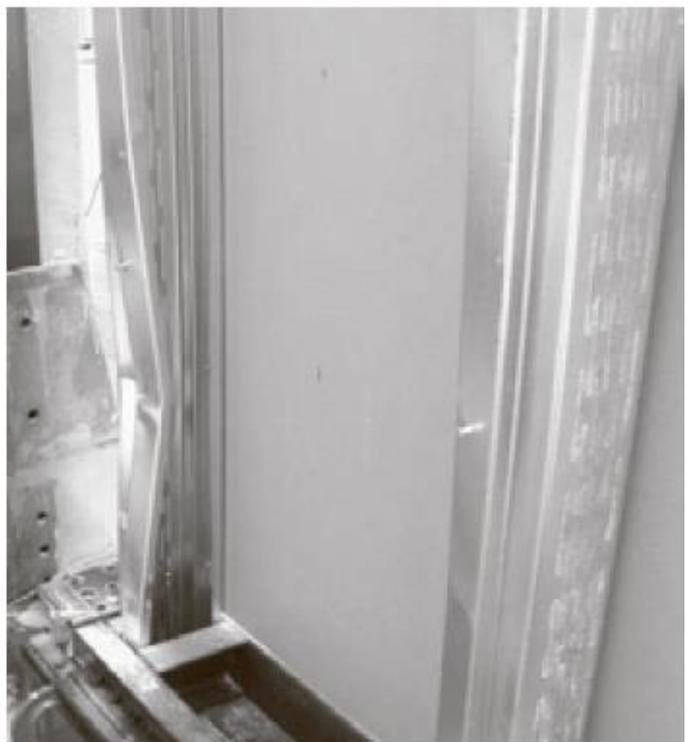


С листом — разрушение = 57,9 кН

Рисунок 3-22. Результат применения стальных листов на режимы разрушения профиля среднего размера



Без листа — разрушение = 57,5 кН



С листом — разрушение = 70 кН

Рисунок 3-23. Воздействие применения стальных листов на режимы разрушения профилей AWS

### 3.4.2.6 Сравнение результатов испытаний по сериям испытаний

Кривые прогиба под нагрузкой для каждого профиля малого размера, среднего размера, большого размера и профилей AWS сравниваются на рисунках 3-24, 3-25, 3-26, и 3-27, соответственно.

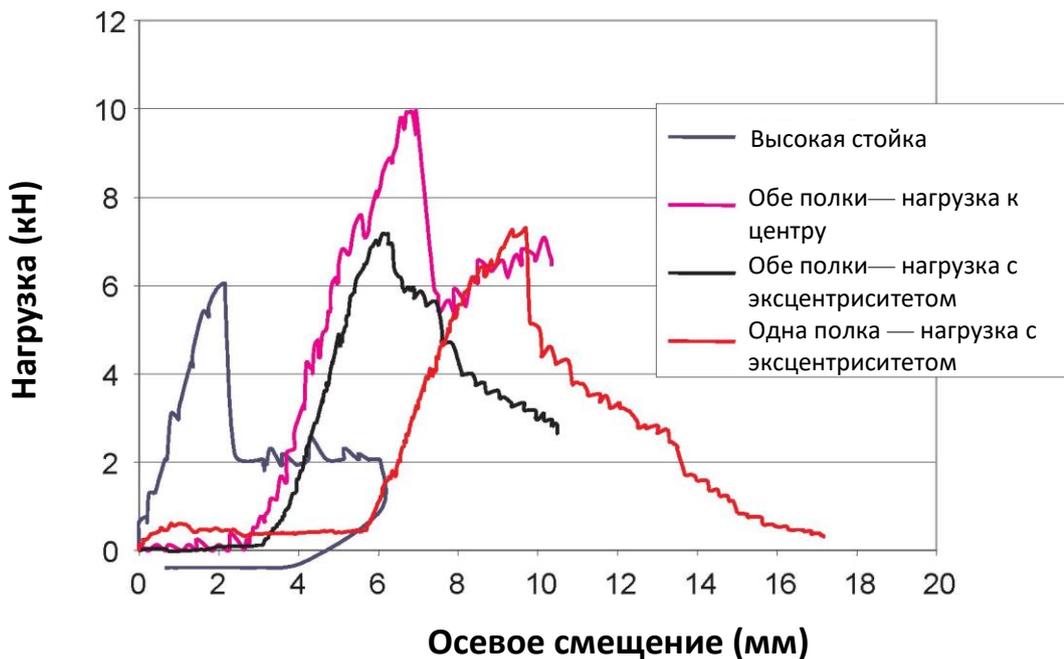


Рисунок 3-24. Сравнение кривых изгиба под нагрузкой для образцов малого размера

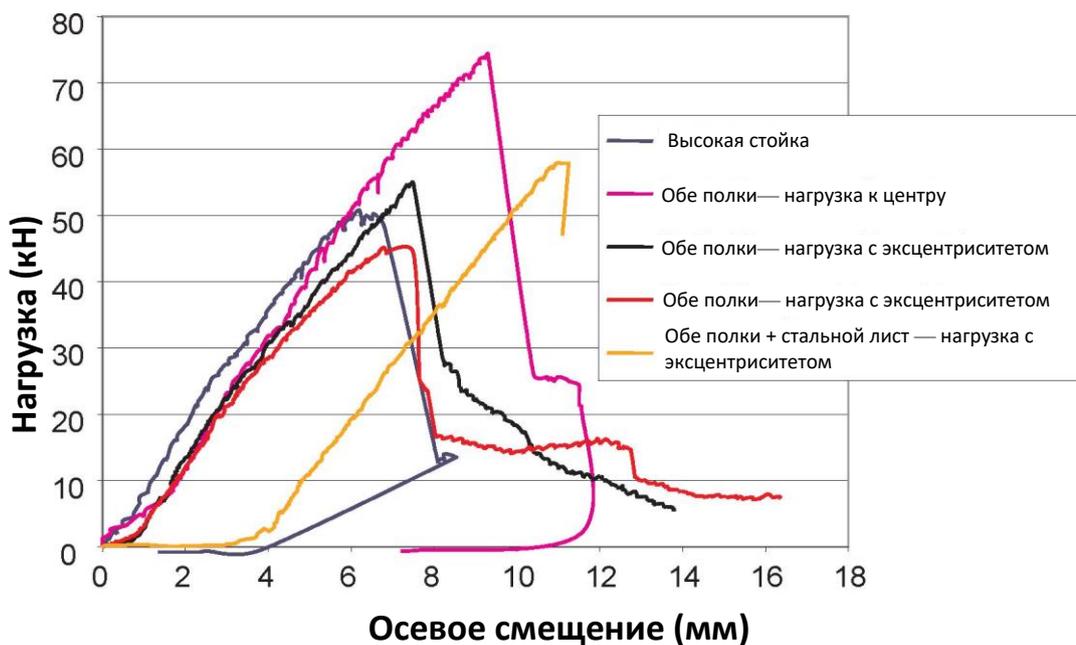


Рисунок 3-25. Сравнение кривых изгиба под нагрузкой для образцов среднего размера

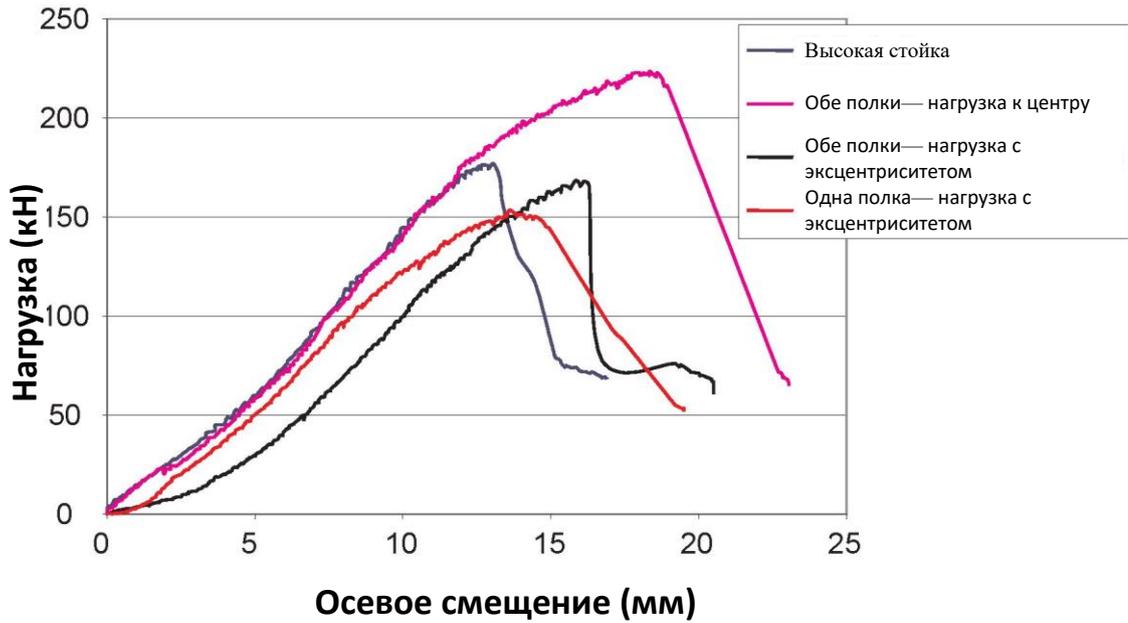


Рисунок 3-26. Сравнение кривых изгиба под нагрузкой для образцов большого размера

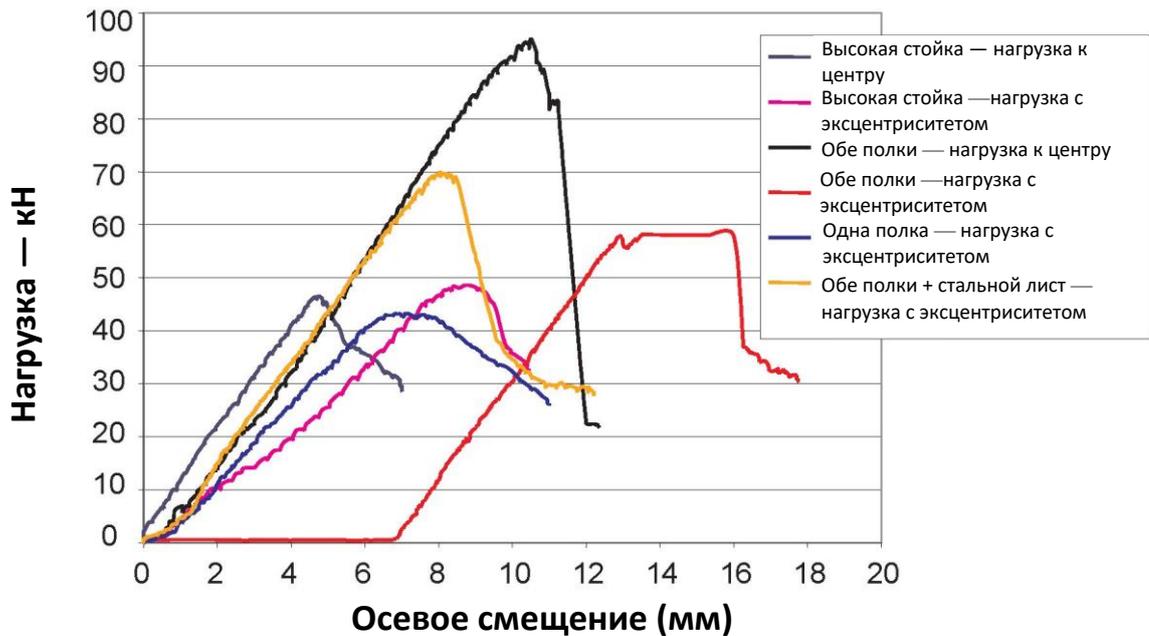


Рисунок 3-27. Сравнение кривых изгиба под нагрузкой для образцов AWS

В разделах выше основное внимание уделяли профилям среднего размера, большого размера и AWS. Это обусловлено тем, что профиль малого размера на самом деле не является «конструктивным» профилем, изготовленным из стали толщиной 0,6 мм. Профили малого размера были исследованы, чтобы обеспечить нижнюю границу для профилей, проверенных в ходе исследования, при этом существует отношение ширины к толщине, которое не подходило бы для рассматриваемых профилей. Однако полученные результаты (рисунок 3-24) действительно согласованы с результатами для других профилей, а начальная жесткость во время каждого испытания практически одинакова после укладки. Разность в максимальной нагрузке в диапазоне между нагрузкой приложенной в центр сечения и с эксцентриситетом составляет прибл. 25 %. Максимальная нагрузка 6,1 кН была достигнута в ходе испытания высоких стоек, демонстрирующего более низкий общий уровень крутильно-изгибной формы потери устойчивости при отсутствии опоры на конструкции из гипсокартона. Тем не менее, примерно такая же нагрузка была обеспечена, когда профиль поддерживался плитами как с обеих сторон, так и только с одной стороны.

Результаты испытаний профилей среднего, большого размера и профилей AWS (рисунки 3-25, 3-26 и 3-27) примерно соответствуют ожиданиям. Начальная жесткость во время всех испытаний остается неизменной вплоть до момента разрушения, когда в соответствующей модели происходит внезапная потеря устойчивости. Что касается разрушающих нагрузок, то, как и ожидалось, чаще всего возникают модели разрушения при местной потере устойчивости.

### 3.4.3 Испытания сборной конструкции «перекрытие-стена»

#### 3.4.3.1 Испытания сборной конструкции «перекрытие-стена» Rannila (финская система)

Сборная конструкция «перекрытие-стена» Rannila была сначала испытана с нагрузкой на стену, приложенную через небольшую фальш стену высотой 150 мм. Такой метод позволяет изучить воздействие нагрузки, направленной через нижнюю часть каркасной стены. Данные испытания не удалось выполнить из-за местной потери устойчивости фальш стены при нагрузке 62 кН на стойку. Это значение очень близко к значению нагрузки при смятии профиля. При этой нагрузке на стене отсутствовали следы повреждений.

Приняли решение повторно испытать сборную конструкцию «стена/перекрытие», удалив фальш стену и приложив нагрузку непосредственно к концевому элементу системы перекрытия. Стена разрушилась при средней нагрузке 67,3 кН на стойку. Обратите внимание, что на каждую стойку воздействует дополнительная нагрузка на перекрытие прилб. 7,5 кН. Кривая зависимости осевого смещения от нагрузки показана на рисунке 3-28. Внешний вид окончательной формы стеновой конструкции после потери устойчивости показан на рисунке 3-29.

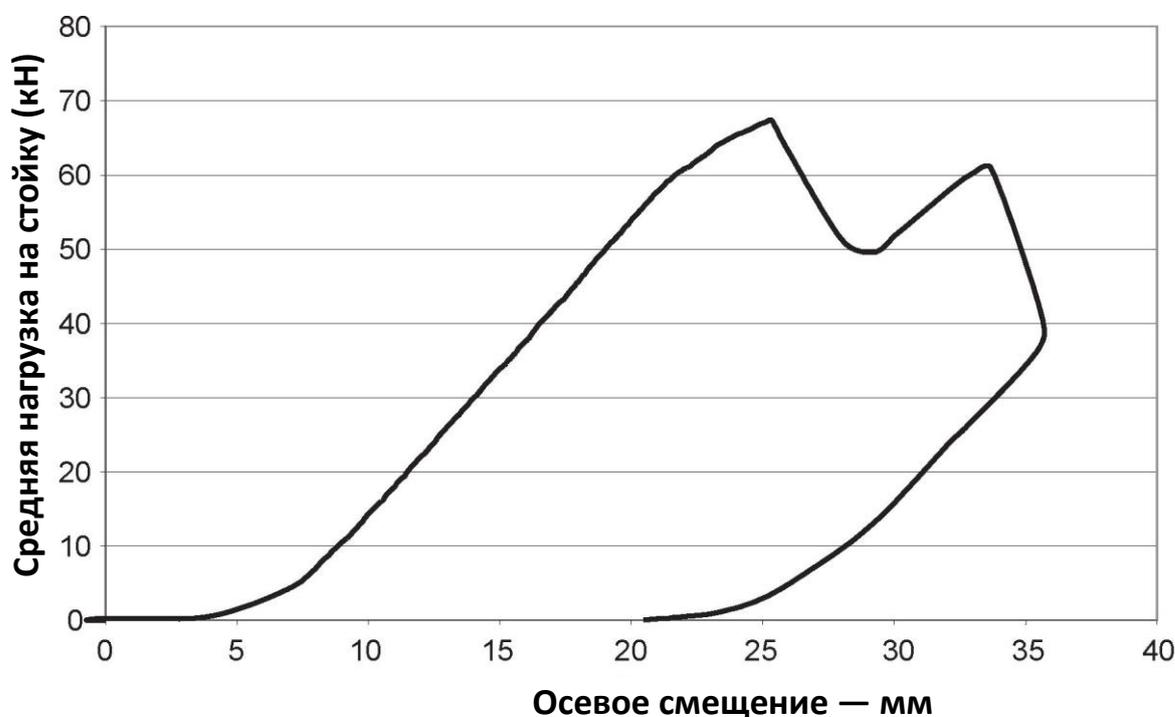


Рисунок 3-28. Нагрузка - Смещение стеновой конструкции Rannila



Рисунок 3-29. Окончательная форма стеновой конструкции Rannila после потери устойчивости

Окончательную разрушающую нагрузку прилбл. 74,8 кН на стойку (включая нагрузку от перекрытия) необходимо сравнить с результатами испытания двойной стойки на нагрузку, проведенного на образце TC150 с идеальными условиями закрепления концов(испытание 24). Это испытание включало воздействие приложенной с эксцентриситетом нагрузки и провалилось при нагрузке 45,6 кН на стойку. Поскольку разрушающая нагрузка значительно превышает нагрузку указанную выше, можно предположить, что в реальных условиях в профиле не возникает большого эксцентриситета. Поэтому вероятно, что стойки будут иметь гораздо более эффективную опору в реальных стенах с закрытыми концами, чем во время испытаний с двойными стойками.

#### **3.4.3.2 Испытания сборной конструкции «перекрытие-стена» Metsec (британская система)**

Приняли решение испытать эту сборную конструкцию «стена/перекрытие», удалив фальш стену и приложив нагрузку непосредственно к концевому элементу системы перекрытий. Стена разрушилась при средней нагрузке 76,9 кН на стойку. Обратите внимание, что на каждую стойку воздействует дополнительная нагрузка на перекрытие прилбл. 7,5 кН. Кривая зависимости осевого смещения от нагрузки показана на рисунке 3-30. Внешний вид окончательной формы стеновой конструкции после потери устойчивости показан на рисунке 3-31.

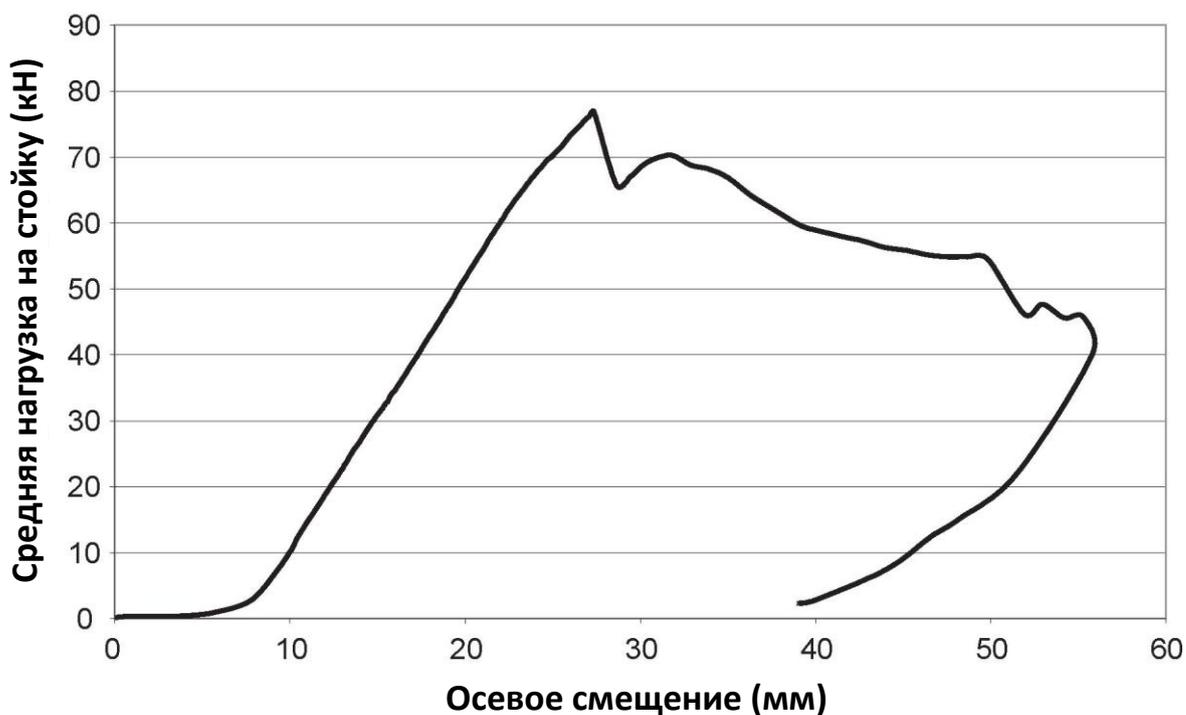


Рисунок 3-30. Нагрузка - Смещение стеновой конструкции Metsec



Рисунок 3-31. Окончательная форма стеновой конструкции Metsec после потери устойчивости

Окончательную разрушающую нагрузку прилбл. 84,4 кН на стойку (включая нагрузку от перекрытия) необходимо сравнить с результатами испытания двойной стойки на нагрузку, проведенного на профиле среднего размера с идеальными условиями закрепления торцов (испытания 4 и 5). Испытание под нагрузкой приложенной с эксцентриситетом привело к разрушению образца при нагрузке на стойку 54,9 кН, а испытание при нагрузке приложенной в центр привело к разрушению при значении 74,4 кН. Поскольку разрушающая нагрузка превышает вышеупомянутые нагрузки, можно предположить, что в реальных условиях в профиле не возникает большого эксцентриситета. Поэтому вероятно, что стойки будут иметь гораздо более эффективную опору в реальных стенах

с закрытыми концами, чем во время испытаний с двойными стойками, и что общий режим разрушения зависит от предела устойчивости профиля к местной потере устойчивости.

### 3.5 ЧИСЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ

#### 3.5.1 Числовое моделирование испытаний коротких стоек

Коммерчески доступную компьютерную программу ABAQUS применяли для моделирования прошедших испытания стальных коротких стоек. Создавалась числовая модель, максимально приближенная к реальным условиям испытаний (см. рисунок 3-32). Основные характеристики моделирования представлены ниже:

- Сама стальная стойка моделировалась на основе 4-узлового элемента оболочки (рисунок 3-32а).
- Торцевые плиты были смоделированы с помощью жестких элементов, которые соответствовали опорной точке, где была приложена нагрузка и существовали граничные условия (см. рисунок 3-32б).
- Для моделирования при комнатной температуре стальные стойки проверяли на основе двух разных типов взаимодействия между торцевой плитой и стальным профилем, чтобы проанализировать воздействие разных граничных условий на концах, а также из-за того, что испытания при комнатной температуре и испытания на огнестойкость проводились с разными концевыми соединениями. Различные типы взаимодействий показаны на рисунке (3-32в). Рисунок иллюстрирует контакт поверхности с поверхностью между профилем стойки и торцевыми плитами, а также ограничения для узла с активными степенями свободы, одинаковыми для этого профиля и торцевых плит.
- Кроме того, во время испытаний при комнатной температуре стальные стойки имели небольшой деревянный брусок, зажатый между фланцами у конца стального профиля. Концевую часть стойки моделировали с учетом жесткости деревянного бруска путем ограничения смещения фланцев в перпендикулярном направлении (см. рисунок 3-32г).
- Для оценки воздействия местной потери устойчивости рассматривали различные степени синусоидальной деформации стойки. Места с дефектами выявляют путем анализа собственных значений. На рисунке (3-32д) показан деформированный вид, полученный путем анализа собственных значений для профиля большого размера.
- Общие дефекты в направлении с усилением вызывались эксцентриситетом приложения нагрузки, который дает предполагаемый изгиб, соответствующий величине  $L/1000$ . Этот метод немного консервативен по сравнению с изгибом.
- Общие дефекты в направлении без усиления вызывались боковым смещением (которое приводит к предполагаемому отклонению дуги), поскольку конечные граничные условия, используемые в ходе моделирования, не позволяют использовать эксцентриситет приложения нагрузки.

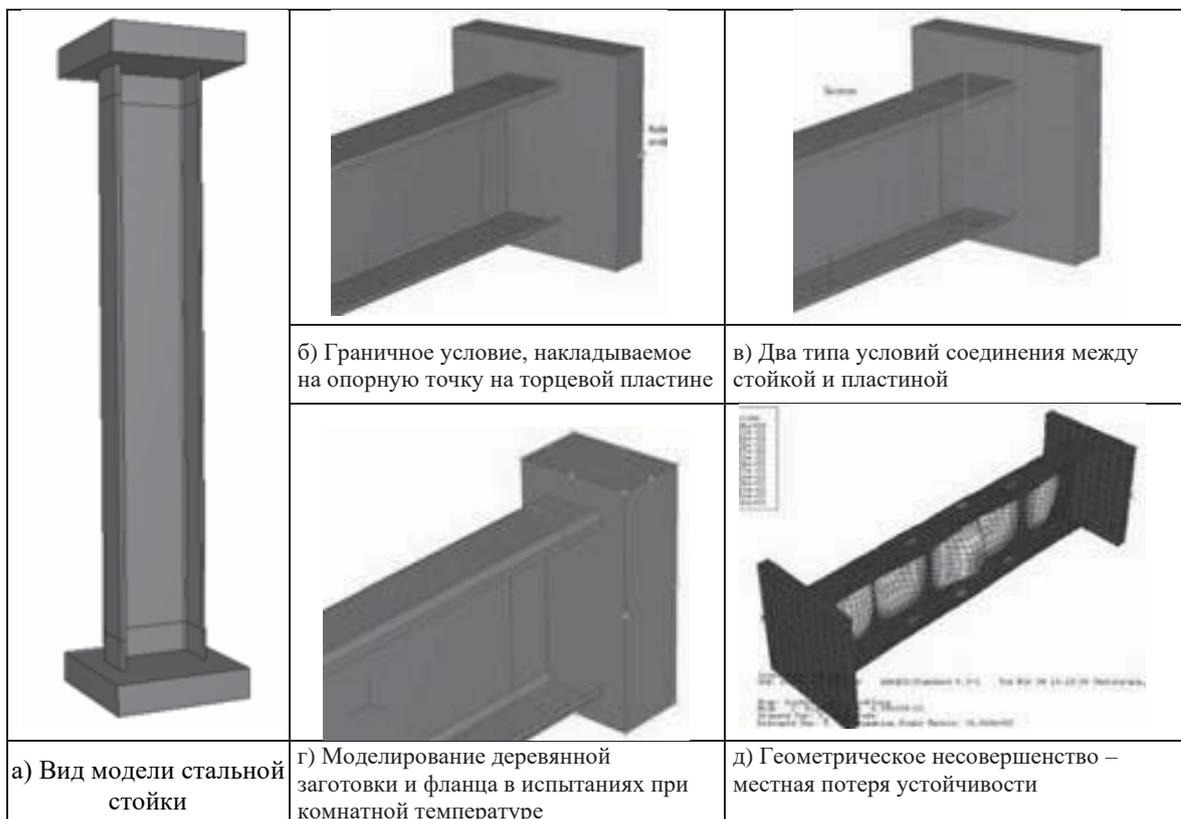


Рисунок 3-32. Принципы моделирования короткой стойки из С-образного профиля

## 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ НЕСУЩИХ СТЕН, ПЕРЕКРЫТИЙ И ИХ СБОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 6.1 ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Характеристики огнестойкости (теплоизоляционные и механические\*) холодногнутого легкого стального элемента исследовались в основном для отдельных элементов. Однако в реальных зданиях эти элементы более широко используются в сборных каркасах, показанных на рисунке 6-1, для создания вертикальных или горизонтальных панелей внутренних перегородок и перекрытий, соответственно.

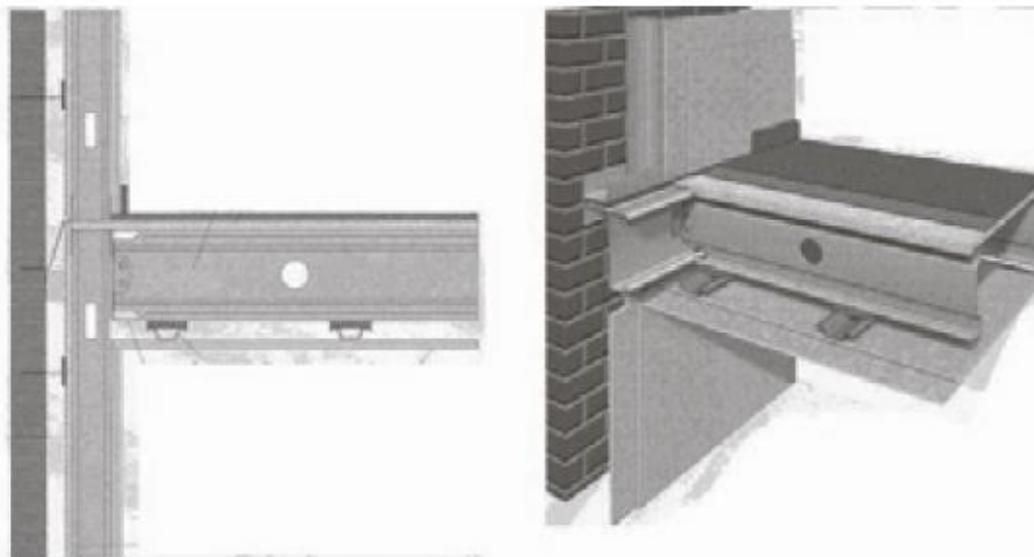


Рисунок 6-1. Сборная многослойная каркасно-обшивная конструкция из стальных холодногнутого профилей

В настоящее время во всем мире проводится множество испытаний горизонтальных или вертикальных сборных панелей [8, 9] на огнестойкость. Но испытание на огнестойкость никогда не выполнялось с общей системой, в состав которой входят как горизонтальные, так и вертикальные панели. Вследствие этого, часть работ в рамках настоящего проекта сконцентрирована на этом элементе, чтобы получить следующую техническую информацию:

- общие характеристики сборных конструкций «стена-перекрытие» в сравнении с характеристиками отдельных панелей в условиях пожара;
- характеристики стыка стеновых панелей и панелей перекрытий при пожаре.

Учитывая сложность проблемы, а также временной график проекта, внимание в основном уделяют экспериментальным исследованиям. В некоторых случаях численное моделирование проводилось только для элементов перекрытия, поскольку на предыдущих этапах проекта уже была проделана важная работа по числовому моделированию элементов, применяемых в стеновых панелях.

## 6.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА

### 6.2.1 Методика испытаний

В обобщенном виде программу испытаний для эффективного сравнения характеристик сборной конструкции «стена-перекрытие» и характеристик отдельной стены или элементов перекрытия можно представить следующим образом:

- испытание элемента перекрытия на основе финской системы строительства;
- испытание элемента стены на основе финской системы строительства;
- испытание сборной конструкции «перекрытие-стена» на основе финской системы строительства;
- испытание элемента перекрытия на основе британской системы строительства;
- испытание элемента стены на основе британской системы строительства;
- испытания сборного элемента «перекрытие-стена» на основе британской системы строительства.

Принцип этих испытаний показан на рисунке 6-2.

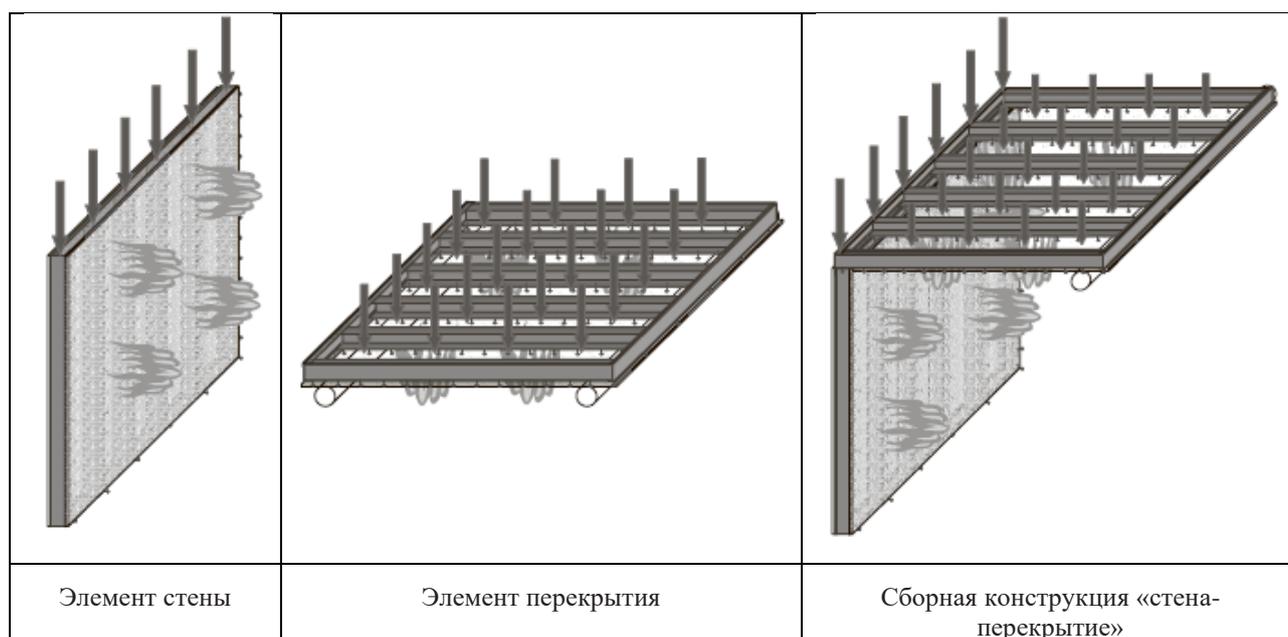


Рисунок 6-2. Типы испытаний несущих легких стальных элементов

В рамках настоящей программы испытаний были исследованы две европейские системы строительства, и в рамках каждой системы строительства были в полной мере испытаны стены, перекрытия и сборная конструкция «стена-перекрытие». Описанная процедура испытаний, с одной стороны, позволила исследовать разницу в характеристиках огнестойкости отдельных элементов и их сборных конструкций, а с другой стороны, проанализировать характеристики огнестойкости в двух различных системах строительства.

Следует отметить, что в рамках британской системы строительства были проведены два испытания сборной конструкции «стена-перекрытие». В ходе этих испытаний создавались разные условия нагружения, чтобы получить разные режимы разрушения сборных конструкций.

### 6.2.2 Выводы по результатам испытаний

В рамках настоящей программы испытаний было выполнено несколько испытаний на огнестойкость, сводные данные по которым представлены в таблицах 6-1 и 6-2.

Следует отметить, что два испытания на огнестойкость были проведены для исследования характеристик огнестойкости сборной конструкции «перекрытие-стена» в рамках британских систем. В таблице представлены результаты только одного из двух испытаний, поскольку в их основе лежит общий механизм разрушения. Тем не менее, следует уделить некоторое внимание второму испытанию сборной конструкции в рамках британской системы, в ходе которого наблюдается особый режим разрушения балок. Этот режим разрушения соответствует расплющиванию балок в месте стыка перекрытия и стены, вызываемому, как правило, сосредоточенной приложенной нагрузкой от домкратов (см. рисунок 6-12). Более подробно это явление описано в пункте 6.2.4.

### **6.2.3 Примеры подробных результатов испытаний**

Экспериментальные результаты, полученные на основе британской системы строительства, представлены в этом пункте в качестве примера, чтобы создать наглядное представление о характеристиках некоторых элементов в различных условиях.

#### **6.2.3.1 Экспериментальные результаты испытаний элементов перекрытий (VTT)**

Элемент перекрытия состоит из шести стоек с поперечным сечением C250x72/64x2,5. Эти стойки, с одной стороны, связаны друг с другом у обоих концов двумя направляющими с помощью соединительных ребер жесткости (см. рисунок 6-3), а с другой стороны, поддерживаются гипсокартоном снизу (два слоя огнестойких плит) и сверху (два слоя стандартных плит).

Перекрытие занимало площадь поверхности свыше 16 м<sup>2</sup> и поддерживалось с двух коротких сторон, пролет между которыми составлял 5240 мм. Нагрузка прикладывалась к перекрытию через три домкрата и 24 точки для моделирования равномерно распределенной нагрузки (см. рисунок 6-3). Суммарная приложенная нагрузка, включая собственный вес элементов перекрытия, составляет 416,7 кг/м<sup>2</sup> и остается постоянной во время испытания.

Снизу на перекрытие воздействовал открытый огонь в нормальном режиме, и испытание длилось около 69 минут. Для измерения нагрева перекрытия применяли более 50 термопар, а прогиб перекрытия измерялся в 4 точках. Типовые экспериментальные результаты испытания показаны на рисунке 6-4. Характеристики перекрытия можно представить в обобщенном виде следующим образом:

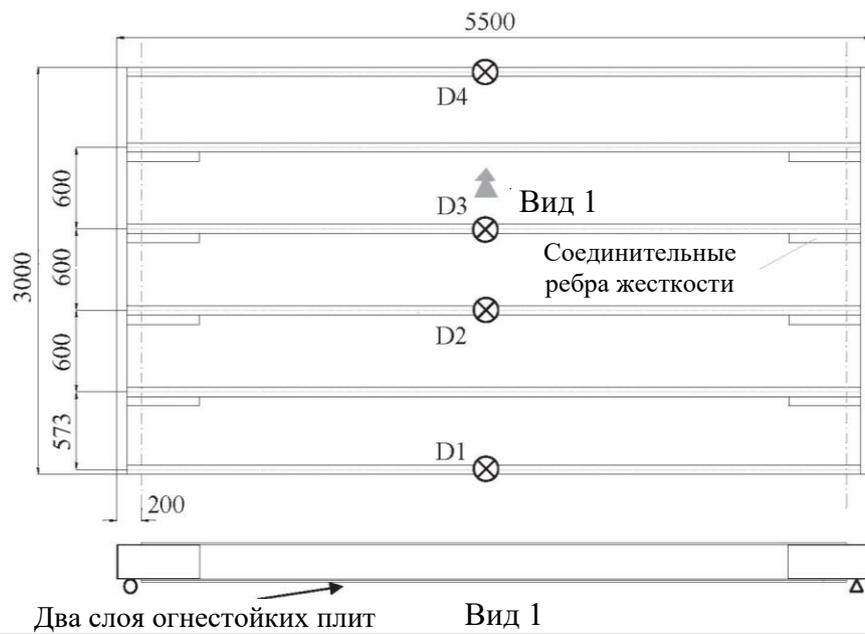
- резкий рост температуры произошел между 40 и 50 минутами испытания на огнестойкость на стыке между первым слоем и вторым слоем, что указывает на разрушение первого слоя и его отрыв от второго слоя гипсокартона;
- прогиб перекрытия оставался относительно слабым до 67 минуты воздействия огня, а затем обрушение произошло довольно быстро в течение короткого периода времени, около 2 минут;
- непосредственно перед обрушением стальные стойки все еще не сильно нагрелись при температуре 400 °С.

Испытание на огнестойкость	Перекрытие	Стена	Сборная конструкция	
			Перекрытие	Стена
Общий размер	2,99 x 5,5 м <sup>2</sup> пролет = 5,24 м	2,8 x 3,0 м <sup>2</sup> (Н x В)	2,99 x 5,5 м <sup>2</sup> пролет = 5,24 м	2,8 x 3,0 м <sup>2</sup> (Н x В)
Профиль стойки	C 250 x 72/64 x 21,5 x 2,5 шаг 600 мм	ТС-150 x 57 x 1,2 шаг 600 мм	C 250 x 72/64 x 21,5 x 2,5 шаг 600 мм	ТС-150 x 57 x 1,2 шаг 600 мм
Гипсокартонные плиты на внешней стороне	2 x GF15* и стальные планки	GN13 + GF15*	2 x GF15* и стальные планки	GN13 + GF15*
Внутренняя изоляция	Стекловата толщиной 70 мм	Минеральная вата толщиной 150 мм (30 кг/м <sup>3</sup> )	Стекловата толщиной 70 мм	Минеральная вата толщиной 150 мм (30 кг/м <sup>3</sup> )
Гипсокартонные плиты на внутренней стороне	Гофрированный стальной лист и 2 x GL15*	GN13*	Гофрированный стальной лист и 2 x GL15*	GN13*
Нагрузка	<b>2,50 кН/м</b>	14 кН/стойка, e = 15 мм на внешней стороне	<b>2,68 кН/м</b>	Осевая нагрузка 10,2 кН/стойка
Продолжительность испытания	84 мин	85 мин	58 мин	
Максимальная температура в стальных стойках	915 °С**	940 °С**	935 °С в стальных стойках элемента перекрытия	
Режим разрушения	Потеря устойчивости на середине длины пролета по направлению к внешней стороне	Потеря несущей способности при изгибе	Потеря несущей способности при изгибе перекрытия	

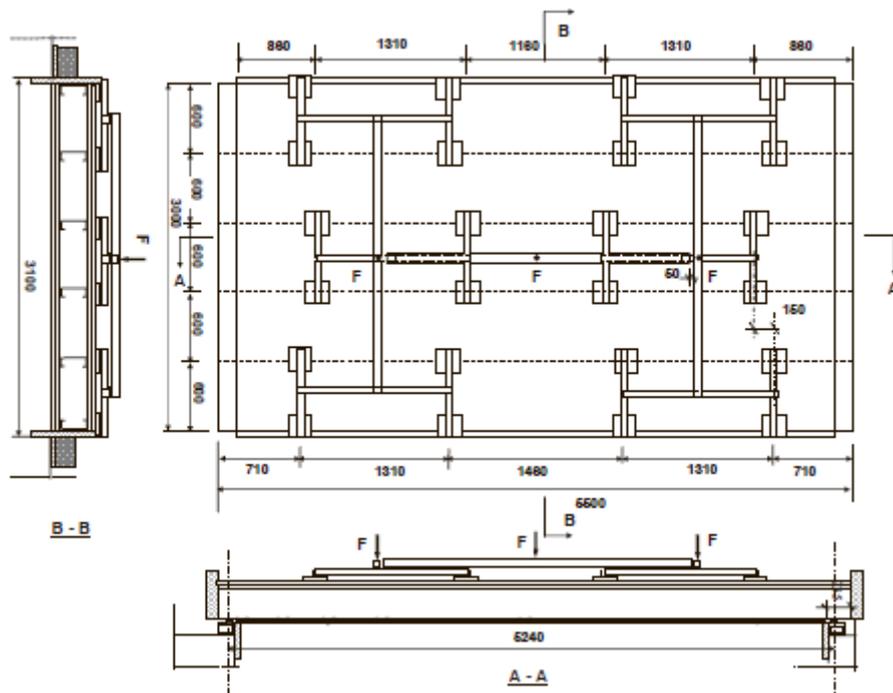
Таблица 6-1. Сводные данные по результатам испытаний на основе финской системы

Испытание на огнестойкость	Перекрытие	Стена	Сборные конструкции	
			Перекрытие	Стена
Общий размер образца	2,99 x 5,50 м <sup>2</sup> Пролет = 5,24 м	2,80 x 3,00 м <sup>2</sup> (h x b)	2,99 x 5,5 м <sup>2</sup> Пролет = 5,24 м	2,8 x 3,0 м <sup>2</sup> (H x B)
Профиль стойки	C 250 x 67 x 2,0 шаг 600 мм	C-150 x 1,2 шаг 600 мм	C 250 x 67 x 2,0 шаг 600 мм	C-150 x 1,2 шаг 600 мм
Гипсокартонные плиты на внешней стороне	2 x GF15*	GN13 + GF15*	2 x GF15*	GN13 + GF15*
Внутренняя изоляция	-	-	-	-
Гипсокартонные плиты на внутренней стороне	2 x GL15*	GN13 + GF15*	2 x GL15*	GN13 + GF15*
Нагрузка	2,5 кН/м на стойку	33 кН на стойку и осевая нагрузка	2,68 кН/м на стойку перекрытия 25 кН на стойку стены	
Продолжительность испытания	69 мин	87 мин	77 мин	
Максимальная температура в стальных стойках	930 °C**	950 °C**	856 °C в стойках перекрытия 427 °C в стойках стены	
Режим разрушения	Потеря несущей способности при изгибе	Потеря устойчивости на середине высоты по направлению к внутренней стороне	Потеря несущей способности перекрытия при изгибе	

Таблица 6-2: Сводные данные по результатам испытаний на основе британской системы



Состав образца



Условие нагружения

Рисунок 6-3. Установка для испытаний элемента перекрытия

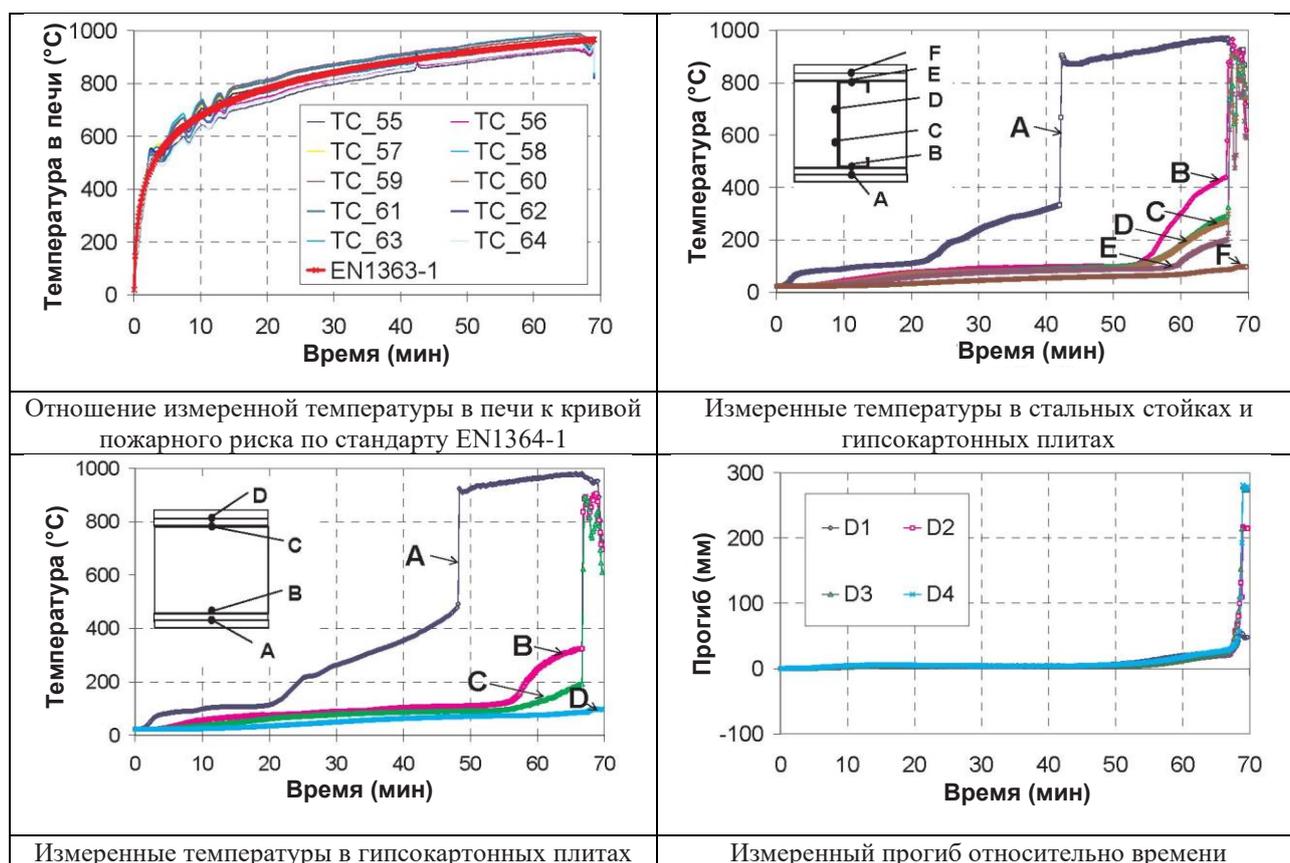


Рисунок 6-4. Показательные экспериментальные результаты

### 6.2.3.2 Экспериментальные результаты испытаний элементов стен (VТТ)

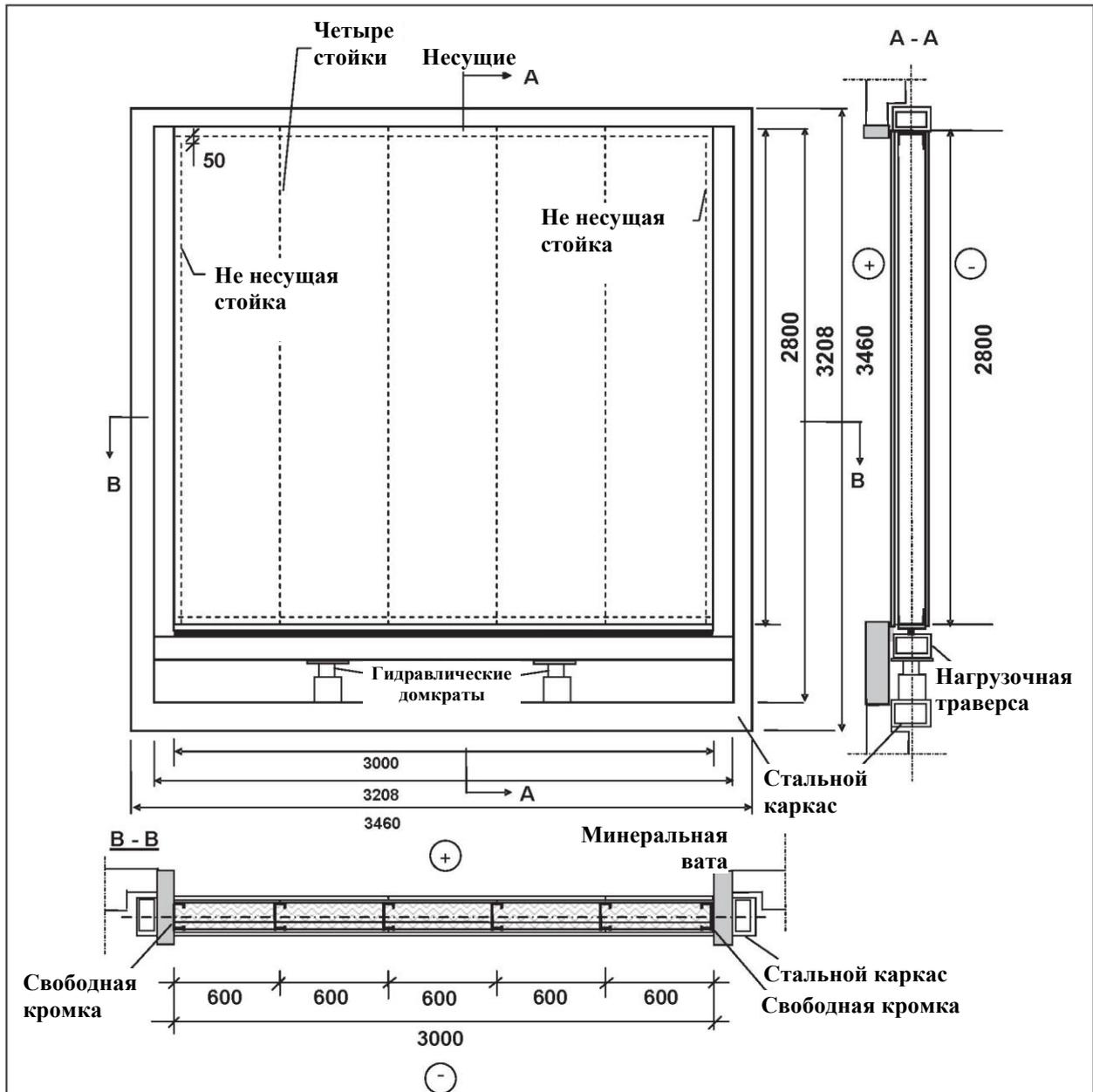
Элемент стены состоит из шести стоек с поперечным сечением С150 x 54 x 15 x 1,2. Нижнюю и верхнюю часть этих стоек вставляют в две легкие стальные направляющие (см. рисунок 6-5). Гипсокартонные плиты размещают в два слоя на внешней стороне и внутренней стороне стены. На внешней стороне сверху расположена огнестойкая плита толщиной 15 мм, а стандартная плита толщиной 13 мм образует второй слой.

Суммарная высота стены составляет 2800 мм, а ее ширина равна 3000 мм. Нижняя часть стены имеет шарнирную опору, а в верхней части стена неподвижно зафиксирована. Нагрузка прикладывалась к нижней части через два домкрата (см. рисунок 6-6) без эксцентриситета. Суммарная приложенная нагрузка составляет  $33 \times 4 = 132$  кН (только для четырех нагруженных стоек) и остается постоянной во время испытания.

На стену воздействовал открытый огонь в нормальном режиме, и испытание длилось около 87 минут. Типовые экспериментальные результаты испытания показаны на рисунке 6-7. Результаты испытания стены можно представить в обобщенном виде следующим образом:

- температура росла медленно и оставалась относительно низкой (примерно 100°C) до 45 минуты воздействия огня;
- начиная с 45 минуты воздействия огня, температура росла быстрее и довольно линейно до момента обрушения стены;
- в момент обрушения максимальная температура составляла приблизительно 450°C;
- изгиб стены оставался достаточно небольшим до 45 минуты воздействия огня, и его значение не превышало 3 мм. В этот момент осевое сжатие, вероятно, вызвано только удлинением от воздействия температуры;
- после 45 минут испытания на огнестойкость рост температуры привел к еще более сильному боковому изгибу, а осевое сжатие изменило знак из-за потери устойчивости стойки при более высоких температурах, при этом наклон также изменил знак из-за еще более значительного изгиба от воздействия температуры;
- после достижения максимального изгиба примерно на 12 мм по направлению к внешней стороне за 65 минут испытания на огнестойкость, боковой изгиб стены оставался на этом уровне до момента ее обрушения, которое, наоборот, произошло на противоположной стороне (внутренней стороне);

- режим разрушения по направлению к внутренней стороне был точно таким же, как и тот, который уже наблюдался в случае с отдельными поддерживаемыми стойками, что может быть вызвано дополнительным эксцентриситетом из-за смещения центра тяжести горячего профиля и центра перераспределенной нагрузки.



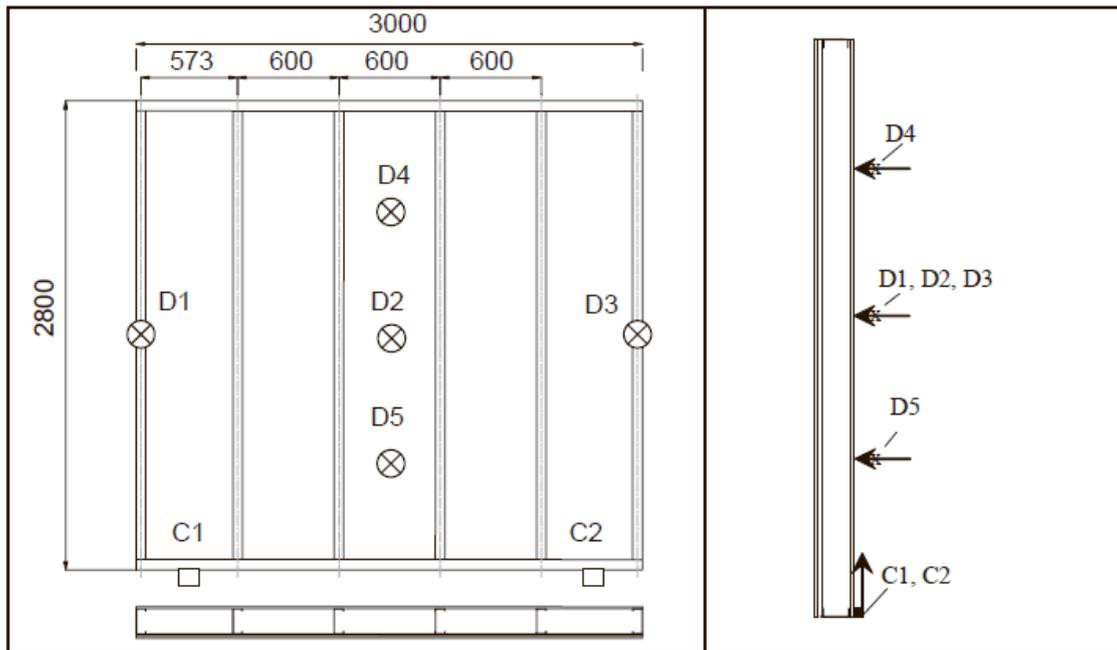
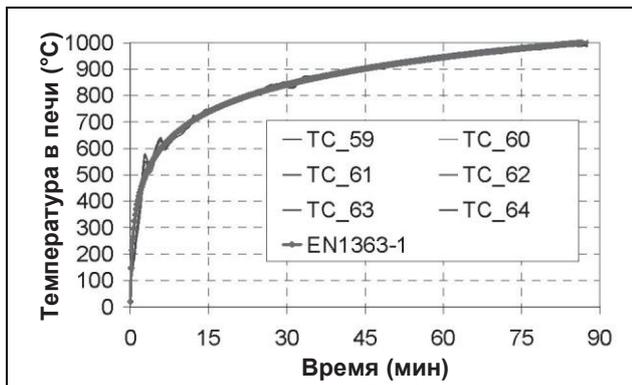
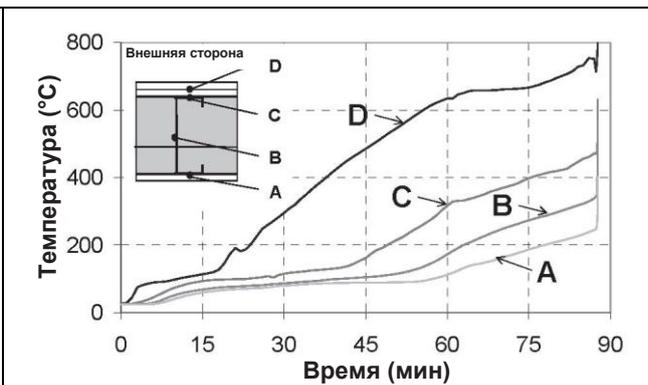


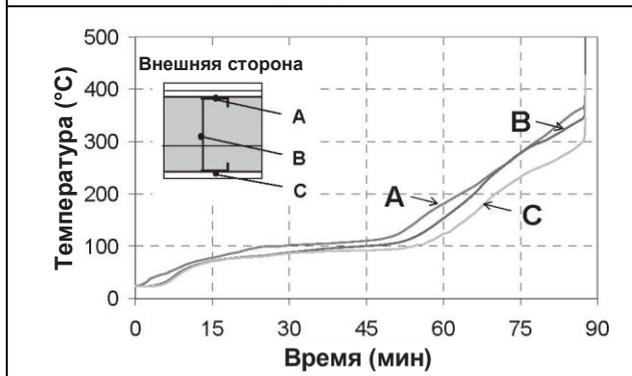
Рисунок 6-5. Установка для испытаний элемента стены



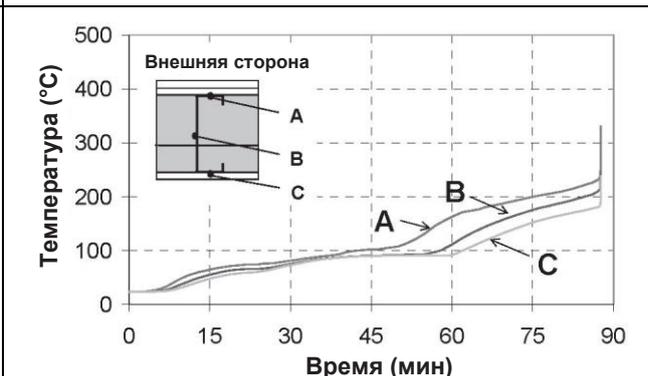
Отношение измеренной температуры в печи к кривой пожарного риска по стандарту EN1364-1



Измеренные температуры в стальных стойках и гипсокартонных плитах на середине высоты



Измеренные температуры в верхней части стальных стоек



Измеренные температуры в нижней части стальных стоек

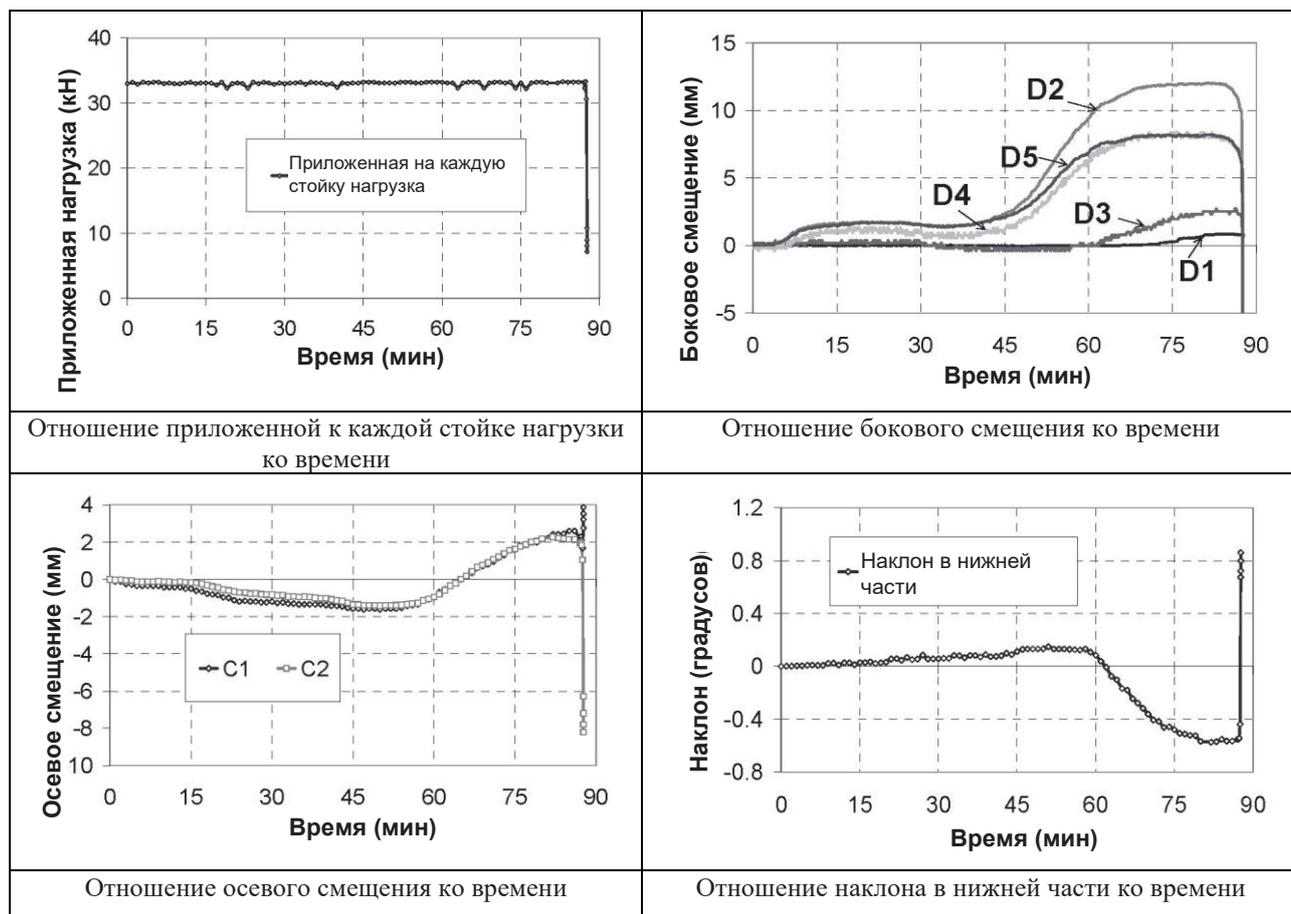


Рисунок 6-6. Типовые экспериментальные результаты испытаний элементов стен

### 6.2.3.3 Экспериментальные результаты испытаний сборной конструкции «перекрытие-стена» (СТКСМ)

Для обеспечения постоянных характеристик элементов перекрытий и стен сборная конструкция состоит из элемента перекрытия, опирающегося с одной стороны на элемент стены (см. рисунок 6-7). Элемент стены состоит из шести стоек с поперечным сечением С150 x 54 x 15 x 1,2, вставленных в нижнюю и верхнюю части двух легких стальных направляющих (см. рисунок 6-5). С внешней стороны эти стойки изолированы двумя слоями гипсокартонных плит, а с внутренней стороны - одним слоем. На внешней стороне сверху расположена огнестойкая плита толщиной 15 мм, а стандартная плита толщиной 13 мм образует второй слой.

Суммарная высота элемента стены в составе сборной конструкции составляет 2800 мм, а ширина — 3000 мм. Элемент стены установлен в нижней части на стальном каркасе. Верхняя часть стены связана с элементом перекрытия с помощью детали, показанной на рисунке 6-7.

Элемент перекрытия в составе сборной конструкции имеет суммарную длину 5500 мм, такую же как во время испытания перекрытия. С одной стороны, элемент перекрытия опирается на опору круглого сечения, а с другой стороны связан с элементом стены (см. рисунок 6-7). Пролет перекрытия от осевой линии стоек до опоры круглого сечения составляет 5240 мм, т.е. он равен пролету во время испытания перекрытия.

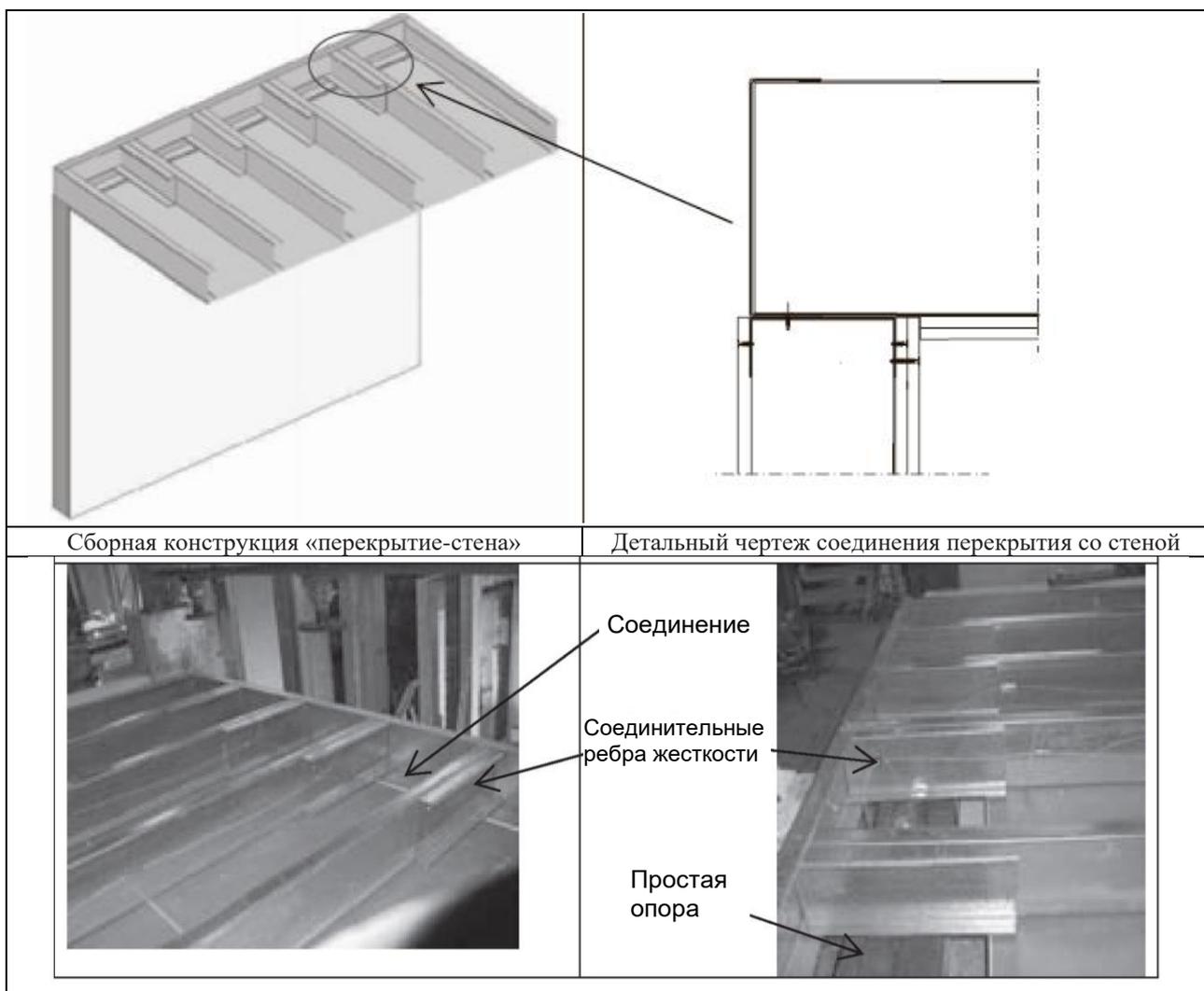
С учетом условий нагружения нагрузка на элемент стены была приложена к верхней части каждой стойки через три домкрата (см. рисунок 6-7) без эксцентриситета. Суммарная приложенная нагрузка составляет  $25 \times 6 = 150$  кН (для всех шести нагруженных стоек) и остается постоянной во время испытания.

Перекрытие нагружали стальными блоками для имитации равномерной распределенной нагрузки. Суммарный вес всех стальных блоков составляет 5802 кг, что обеспечивает равномерную распределенную нагрузку  $369 \text{ кг/м}^2$ . В этом случае к балке приложена нагрузка  $221 \text{ кг/м}^2$ .

На всю поверхность сборной конструкции воздействовал открытый огонь в нормальном режиме согласно требованиям части 1 стандарта EN1.363. Продолжительность испытания составила 78 минут. Типовые

экспериментальные результаты испытания показаны на рисунке 6-8. Результаты испытания сборной конструкции можно представить в обобщенном виде следующим образом:

- температура росла медленно и оставалась относительно низкой (примерно 100°C) в стальных балках перекрытий до 60 минуты воздействия огня;
- падение первого слоя нижних гипсокартонных плит на пол произошло примерно на 50 минуте испытания на огнестойкость и, видимо, сначала это случилось около простой опоры, а затем примерно через 20 минут в другом месте;
- после падения первого слоя нижних гипсокартонных плит на пол рост температуры начинал приобретать немного большее значение, и температура росла все быстрее и быстрее вплоть до обрушения сборной конструкции;
- температура элемента стены одновременно медленно росла примерно до 100 °C спустя 50 минут испытания на огнестойкость, а затем росла быстрее до примерно 400 °C в момент обрушения;
- обрушение сборной конструкции было вызвано потерей несущей способности перекрытия через 76 минут испытания на огнестойкость. В этот момент максимальная температура стальных соединений равна примерно 300 °C;
- максимальное боковое смещение стены до обрушения составляет около 10 мм в сторону огня, и в момент обрушения эти смещения изменили знак, что, вероятно, было вызвано увеличением прогиба перекрытия, поворачивающего стену в сторону от огня.





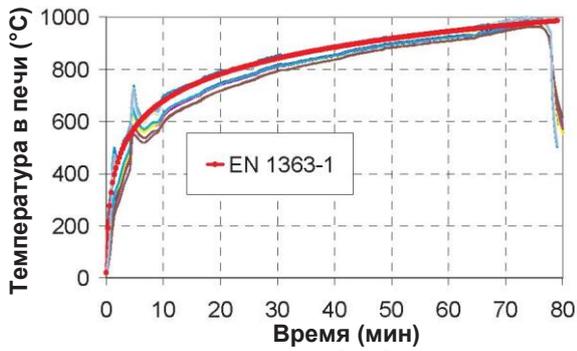
Нагружение перекрытия стальными блоками



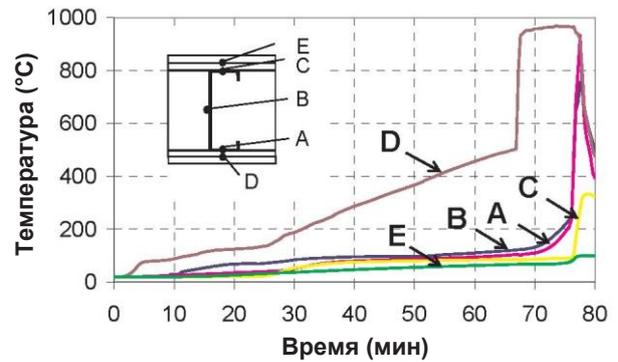
Нагружение стены с помощью домкратов

Условия опирания и нагружения сборной конструкции «перекрытие-стена»

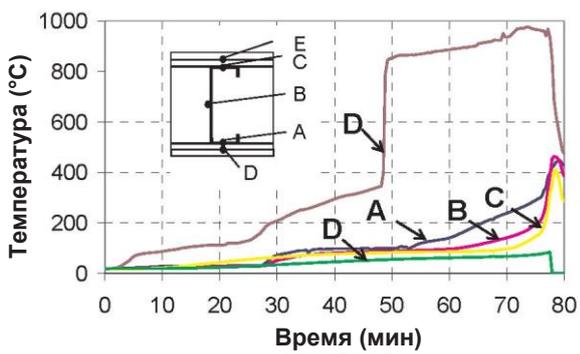
Рисунок 6-7. Установка для испытаний сборной конструкции «перекрытие-стена» по британской системе



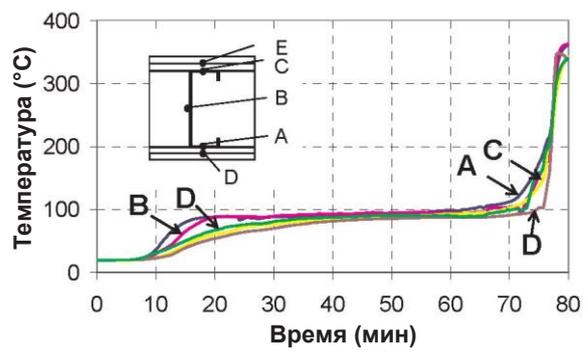
Отношение значений температуры в печи по стандарту EN 1363-1 ко времени



Измеренные температуры в стальных балках и гипсокартонных плитах перекрытия в середине пролета



Измеренные температуры в стальных балках перекрытия рядом с простой опорой



Измеренные температуры в стальных балках перекрытия рядом с соединением

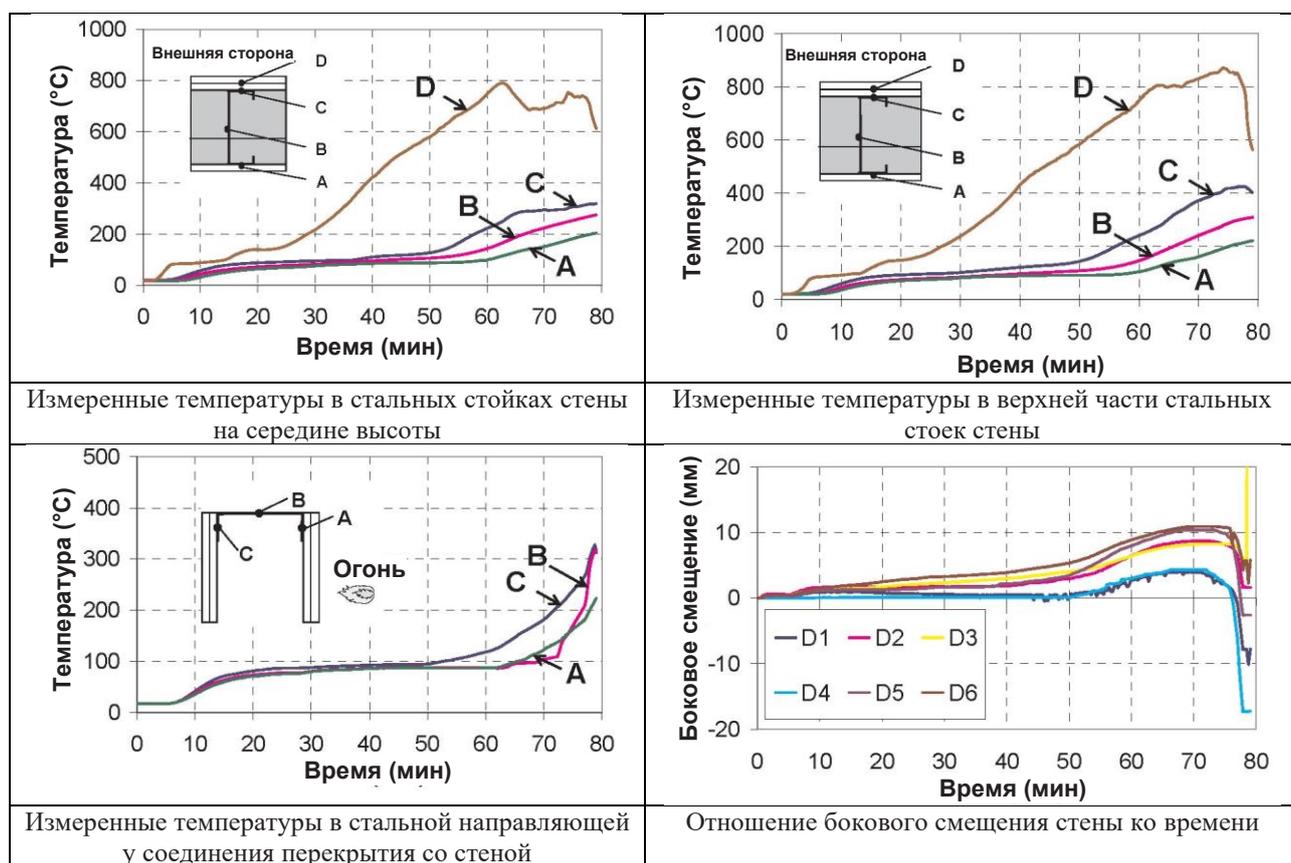


Рисунок 6-8. Типовые экспериментальные результаты испытаний сборной конструкции «перекрытие-стена» по британской системе

#### 6.2.4 Сравнение характеристик огнестойкости отдельных элементов и сборных конструкций

Как было описано выше, элементы перекрытий и стен испытывались по отдельности в компании VTT, а сборные конструкции из этих элементов — в компании STICM. Следовательно, очень полезно сравнить характеристики огнестойкости отдельных элементов и сборных конструкций из этих элементов. Кроме того, это сравнение можно выполнять в рамках двух разных систем, а именно финской и британской системы, поскольку обе они были исследованы в ходе испытаний на огнестойкость.

Что касается финской системы, в 2000 году компания VTT провела испытания отдельного элемента перекрытия и элемента стены в рамках данного проекта. Во время испытания на огнестойкость, выполненного компанией STICM для сборной конструкции, состоящей из элемента перекрытия и элемента стены, разрушение произошло примерно через 56 минут воздействия огня на балки перекрытия. В данном случае сравнение в основном касается характеристик этого элемента в двух конструктивных системах разного типа. По сути, из сводной таблицы в пункте 6.2.2 (таблица 6-1) следует, что нагрузка, приложенная на перекрытие, в обоих испытаниях примерно одинакова (приложенная нагрузка во время испытания в компании STICM немного выше, чем во время испытания в компании VTT). Однако огнестойкость значительно отличается (58 минут во время испытания в компании STICM и 84 минуты во время испытания в компании VTT). Если внимательнее изучить режим нагрева, зарегистрированный во время этих испытаний, то можно заметить, что эта разница в огнестойкости вызвана совершенно различными характеристиками гипсокартонных плит. В ходе испытания в компании STICM падение первого слоя из внешних гипсокартонных плит произошло всего через 35 минут огневого воздействия. А в ходе испытания в компании VTT это произошло только через 70 минут огневого воздействия. Тем не менее, измеренные прогибы перекрытий во время обоих испытаний не только очень малы, но и примерно равны вплоть до 45 минуты воздействия огня.

Кроме того, следует упомянуть о росте температуры двойных балок во время испытания в компании STICM. Температура росла намного быстрее после 45 минут воздействия огня по сравнению с испытаниями одинарных балок. Однако во время испытания в компании VTT не было разницы в нагреве одинарных и двойных балок до 70 минуты воздействия огня. Очевидно, это значительное повышение температуры приведет к сильному прогибу элемента перекрытия, что вызовет его преждевременное обрушение из-за более раннего падения второго слоя

гипсокартона. Следовательно, характеристики гипсокартона являются параметром, определяющим различия в огнестойкости во время испытания сборной конструкции и испытания отдельного элемента перекрытия.

Различные характеристики гипсокартонных плит во время испытаний в компаниях VTT и СТІСМ можно объяснить разным режимом нагрева двух крайних стальных балок элемента перекрытия. Во время испытания в компании СТІСМ было замечено, что вместо равномерного обрушения разрушение произошло у одной кромки (см. рисунок 6-10). Фактически, этот режим разрушения был обусловлен тем, что нижний фланец одной крайней стальной балки был намного сильнее нагрет, чем фланец другой балки. В этом случае влияние изгиба станет еще сильнее по сравнению с другой крайней стальной балкой, что приведет к более значительному прогибу, который, по-видимому, является определяющим параметром для характеристик гипсокартонных плит. Кроме того, на начальном этапе разрушение началось со стороны более нагретой крайней балки из-за ее режима нагрева. Следует отметить, что этот режим нагрева может сильно отличаться от фактических условий, в которых стальные балки должны быть однородно изолированы гипсокартонными плитами, а граничный эффект следует устранять, создавая соответствующую строительную компоновку.

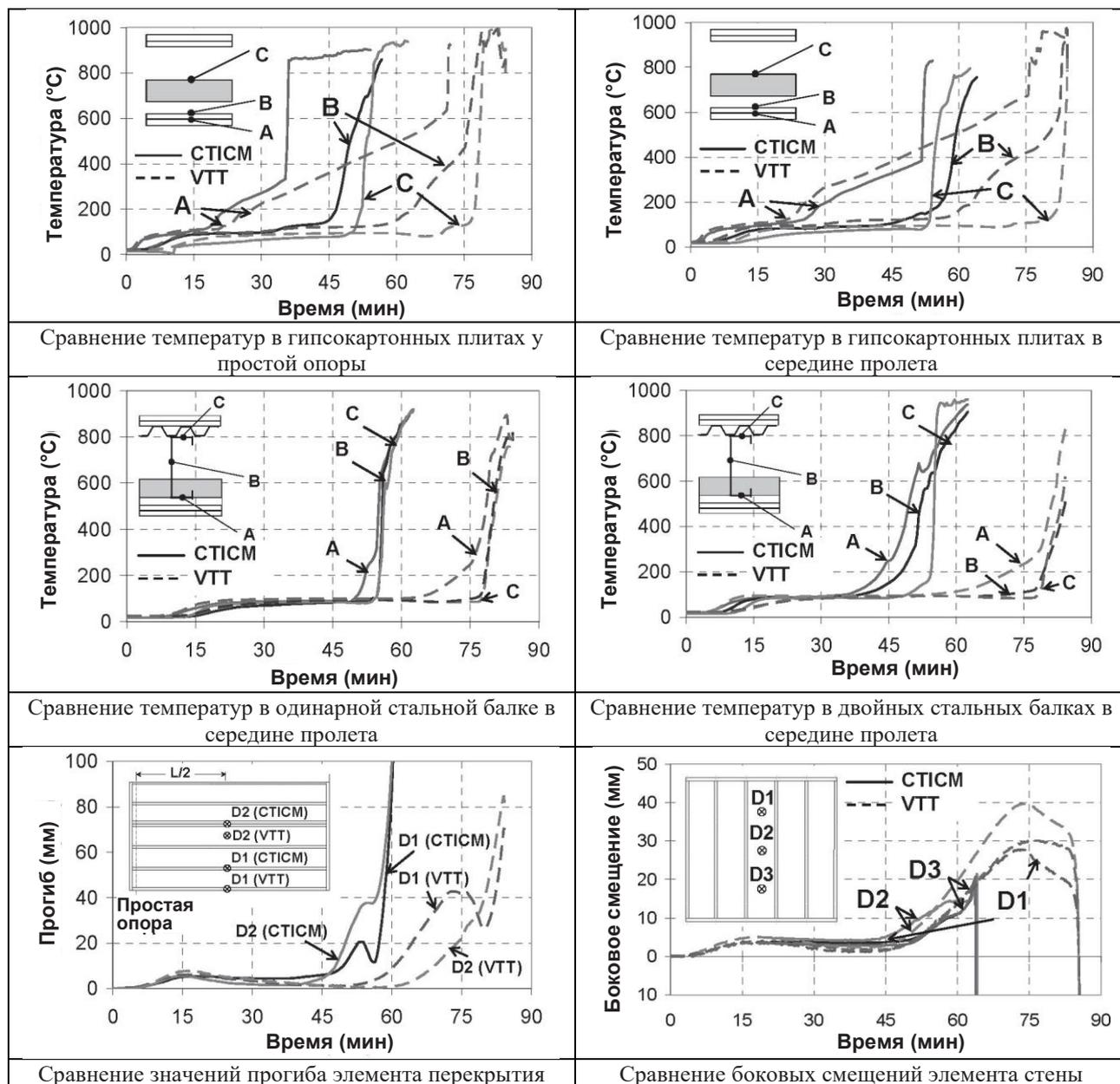


Рисунок 6-9: Сравнение результатов испытаний на основе финской системы строительства

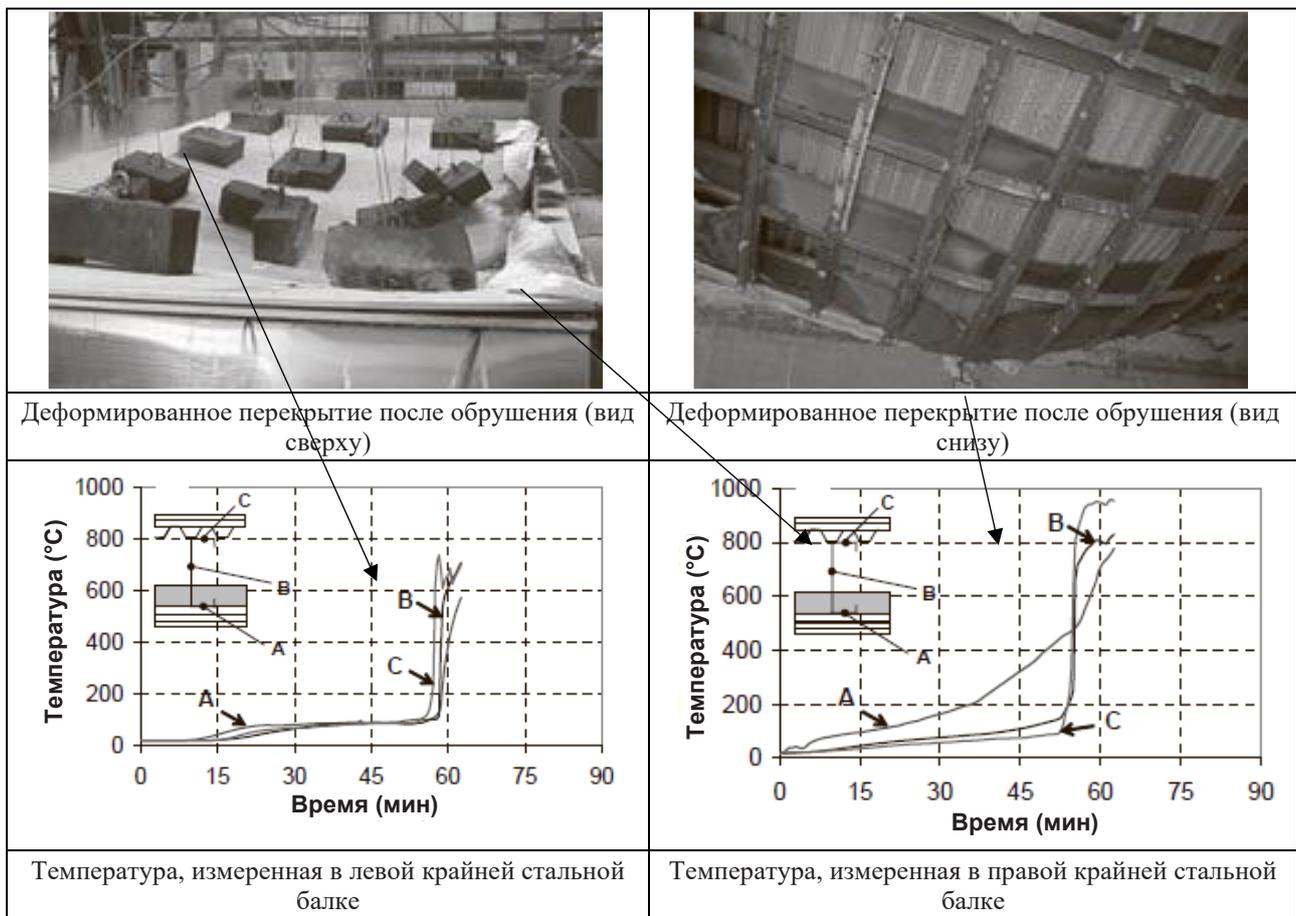


Рисунок 6-10. Режим разрушения во время испытания сборной конструкции на основе финской системы строительства

Все испытания элемента перекрытия, элемента стены и сборной конструкции «перекрытие-стена» на огнестойкость проводились на основе британской системы в рамках фактического проекта. Как и в случае с финской системой, компании VTT и STICM проводили испытания отдельных элементов и сборной конструкции. Кроме того, компания STICM провела два испытания сборных конструкций «перекрытие-стена» на огнестойкость. Во время испытания первой сборной конструкции обрушение образца было вызвано разрушением элемента перекрытия, а во время испытания второй сборной конструкции разрушение произошло в месте соединения перекрытия со стеной из-за смятия стальных балок, а также ребер жесткости под действием нагрузки от домкратов. Таким образом, сравнение результатов испытания первой сборной конструкции по британской системе и результатов испытания отдельных элементов кажется более интересным и значимым.

Краткая сравнительная таблица, в которой перечислены сходства и различия между испытаниями отдельных элементов в компании VTT и испытаниями сборных конструкций в компании STICM, приведена ниже (таблица 6-3).

Параметры		Испытания в компании VTT	Испытания в компании STICM
Пролет между балками перекрытия		5240 мм	5240 мм
Высота стойки стены		2800 мм	2800 мм
Условия закрепления	Перекрытие	С простой опорой	Простая опора с одной стороны и крепление к стойкам стены с другой стороны
	Стена	Неподвижная фиксация в верхней части и шарнирное опирание в нижней части	Нижняя сторона вставлена в направляющие, а верхняя сторона скреплена с балками перекрытия
Приложенная нагрузка		2,5 кН/м на балку перекрытия и 33 кН на каждую стойку стены	2,68 кН/м на балку перекрытия и 32 кН на каждую стойку стены

Таблица 6-3. Сравнение условий испытаний по британской системе строительства

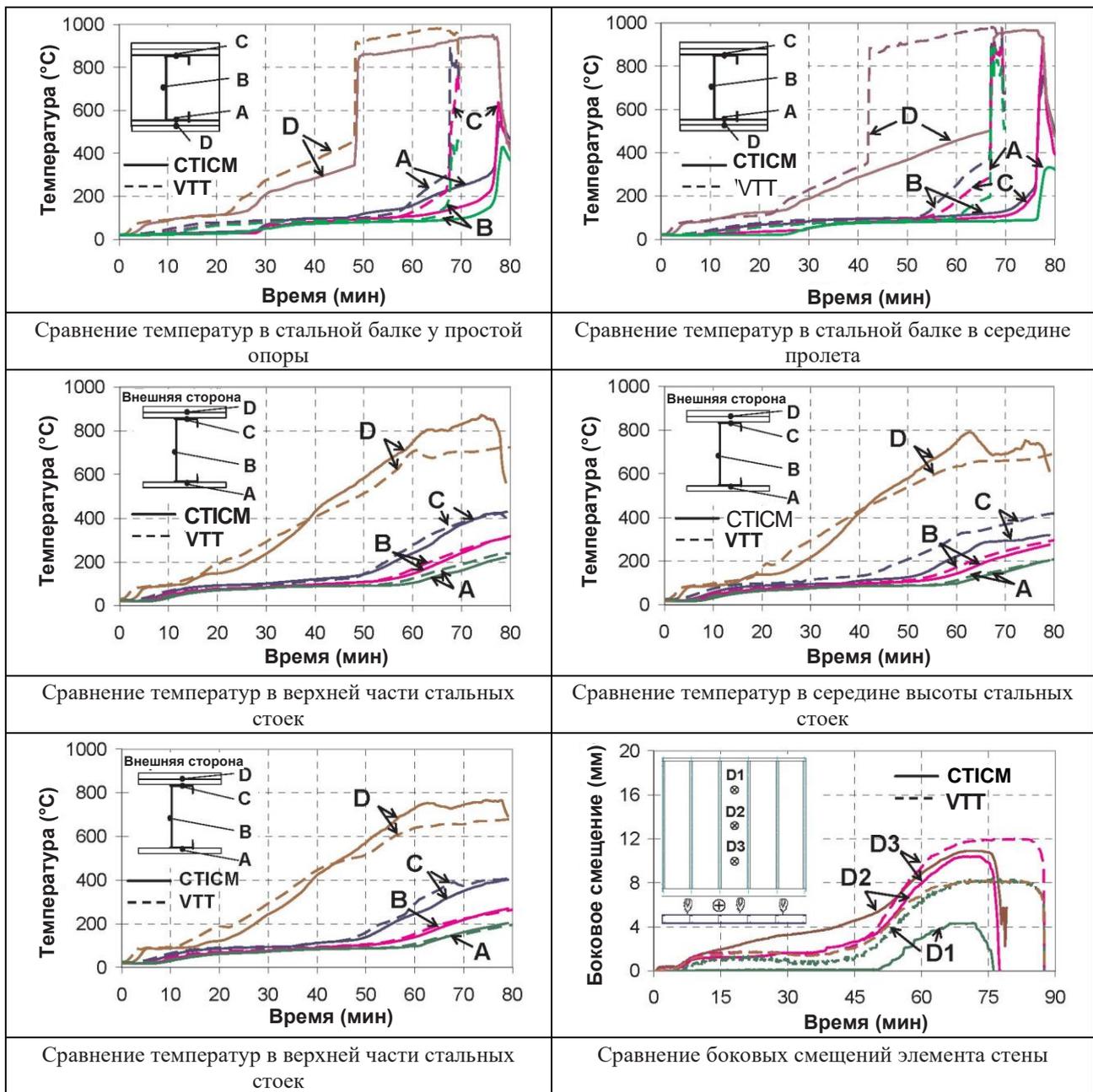


Рисунок 6-11. Сравнение результатов испытаний на основе британской системы строительства

Сравнивая рост температуры во время испытаний отдельных элементов и испытания сборной конструкции, можно заметить (рисунок 6-11), что падение первого слоя нижних гипсокартонных плит в ходе испытания перекрытий в компании VTT происходило везде (в середине пролета и рядом с опорой) во временном промежутке между 45 и 50 минутами. А во время испытания сборной конструкции в компании STICM падение происходило примерно в то же время возле простой опоры, но в середине пролета и возле соединения перекрытия со стеной во временном промежутке между 65 и 70 минутами воздействия огня, т. е. намного позже. На основе этого различия можно объяснить, почему разрушение во время испытания перекрытия в компании VTT произошло раньше, чем разрушение перекрытия во время испытания сборной конструкции в компании STICM. Рост температуры будет быстрее, если падение гипсокартона происходит раньше, что, в свою очередь, увеличивает прогиб перекрытия, вызывая появление большего количества трещин в гипсокартоне, а также ускоряя рост температуры стальных балок.

Что касается нагрева стоек стены, то во время испытания элемента стены и испытания сборной конструкции он практически одинаков.

В этом испытании сборной конструкции на основе британской системы механическое обрушение снова произошло на балках перекрытия. Но, в отличие от финской системы, в ходе испытания сборной конструкции по

британской системе перекрытие не разрушалось дольше, чем во время испытания отдельных элементов перекрытия (77 минут вместо 69 минут), поскольку, как было отмечено выше, из-за меньшего нагрева даже на стальные балки воздействуют немного более высокие нагрузки. По сути, все вышеупомянутые различия напрямую связаны с поддержанием характеристик гипсокартонных плит относительно характеристик стальных балок. Важная рекомендация, следующая из полученных экспериментальных результатов, заключается в необходимости иметь абсолютно надежную конструкцию системы крепления гипсокартонных плит к стальным опорным элементам. Режим разрушения второй сборной конструкции по британской системе - еще один интересный аспект, который следует обсудить. Это разрушение предполагает собой расплющивание соединения под приложенной нагрузкой во время испытания (см. рисунок 6-12).

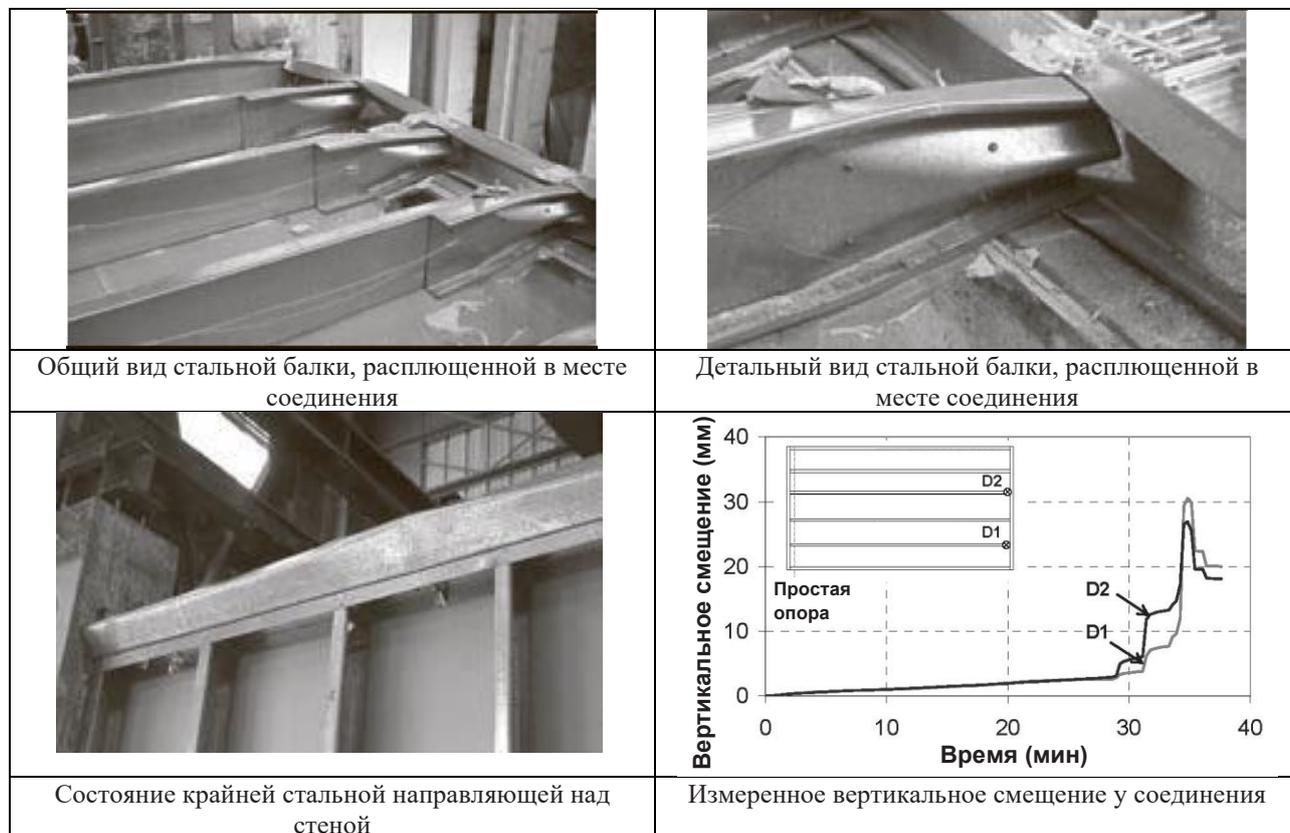


Рисунок 6-12. Режим разрушения во время испытания второй сборной конструкции на основе британской системы строительства

Обрушение произошло всего лишь через 36 минут воздействия огня (см. рисунок 6-12). Но в этот момент нагрев стальных балок все еще был очень слабый (около 100 °С), и нагрузка, воздействующая на каждую балку, также довольно мала — всего лишь 31 кН (см. рисунок 6-13). По сути, этот режим разрушения уже был во время испытания при комнатной температуре, но разрушающая нагрузка достигала 65 кН на балку, что вдвое больше, чем при испытании на огнестойкость. Данный режим разрушения указывает на то, что необходимо больше внимания уделять проектированию деталей передачи нагрузки легких стальных конструкций, чтобы исключить их внезапное преждевременное обрушение.

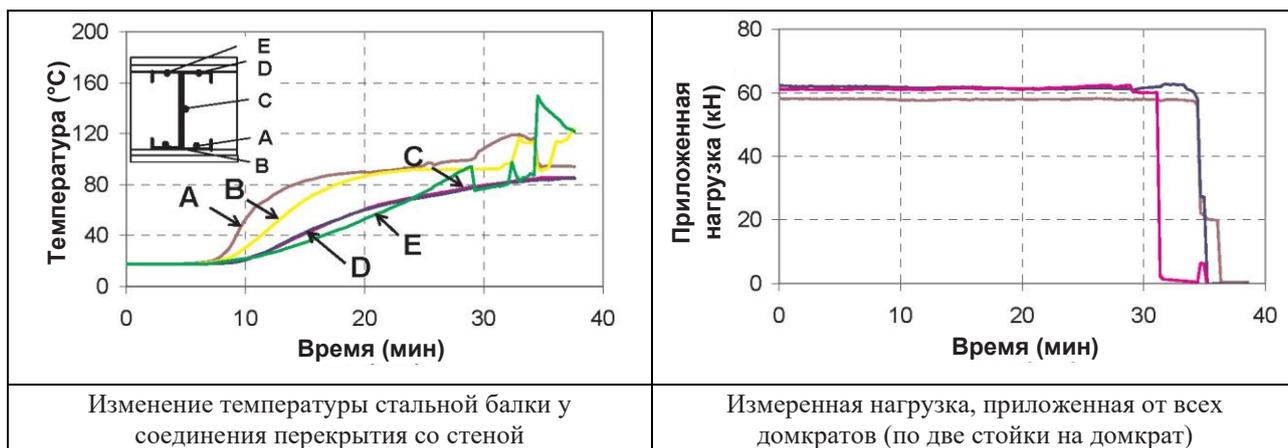


Рисунок 6-13. Нагрев стальной балки и приложенная нагрузка во время испытания второй сборной конструкции на основе британской системы строительства

### 6.3 ЧИСЛОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОГНЕСТОЙКОСТИ БАЛОК ПЕРЕКРЫТИЯ

Ранее, в рамках проекта, многочисленные проведенные числовые испытания касались только холодногнутых легких стальных элементов, подверженных действию сжимающей силы в качестве основной нагрузки. Однако балки различных испытанных перекрытий в основном подвергались изгибу. Для проверки достоверности современных числовых моделей провели числовой анализ, результаты которого представлены ниже.

#### 6.3.1 Допущения при числовом моделировании

При числовом моделировании балки элементов перекрытия и сборных конструкций «перекрытие-стена» моделируются как отдельные элементы с простой опорой, находящиеся под равномерно распределенной нагрузкой, которая приложена к верхней полке балки. Поскольку балки закреплены гипсокартонными плитами по нижней и верхней полке, они не смещаются в боковом направлении. Кроме того, смещение двух кромок балок в боковом направлении ограничено за счет стыковки стальных направляющих. Все эти детали моделирования представлены на рисунке 6-14.

Чтобы принять в расчет возможную местную потерю устойчивости балок, перед анализом балки в условиях огневого воздействия был выполнен анализ собственных значений с целью применения начального геометрического несовершенства балки, форма которой показана на рисунке 6-15.

Что касается модели материала, приняты понижающие коэффициенты, поскольку стали, применяемые во всех испытаниях элементов перекрытий, получены от одних и тех же производителей.

Еще одно важное допущение, которое необходимо упомянуть, — это условия нагрева балки, используемые при числовом моделировании. Поскольку температура балок в ходе испытаний измерялась на нескольких поперечных сечениях по их длине, можно приписать реальное температурное поле смоделированной стальной балке на основе результатов экспериментов. Это правило применялось во всех числовых моделированиях стальных балок, представленных ниже.

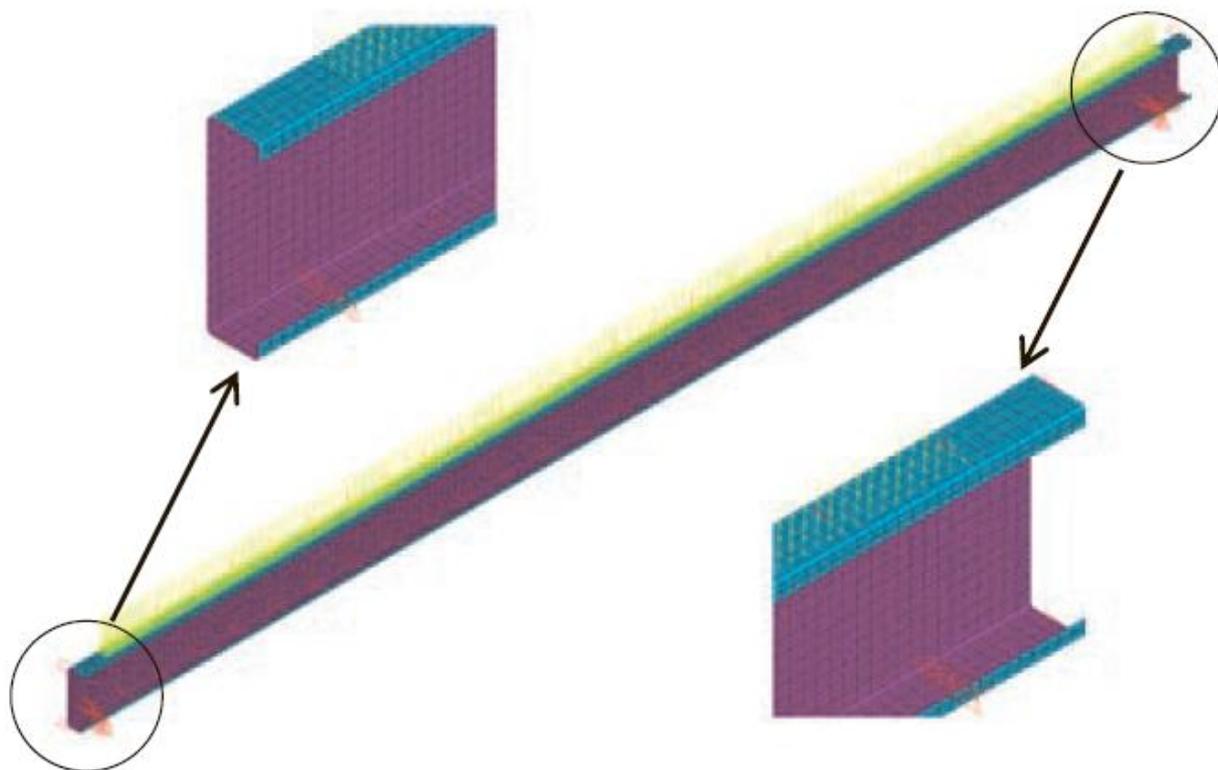


Рисунок 6-14. Граничные условия и условие нагружения балки при числовом моделировании

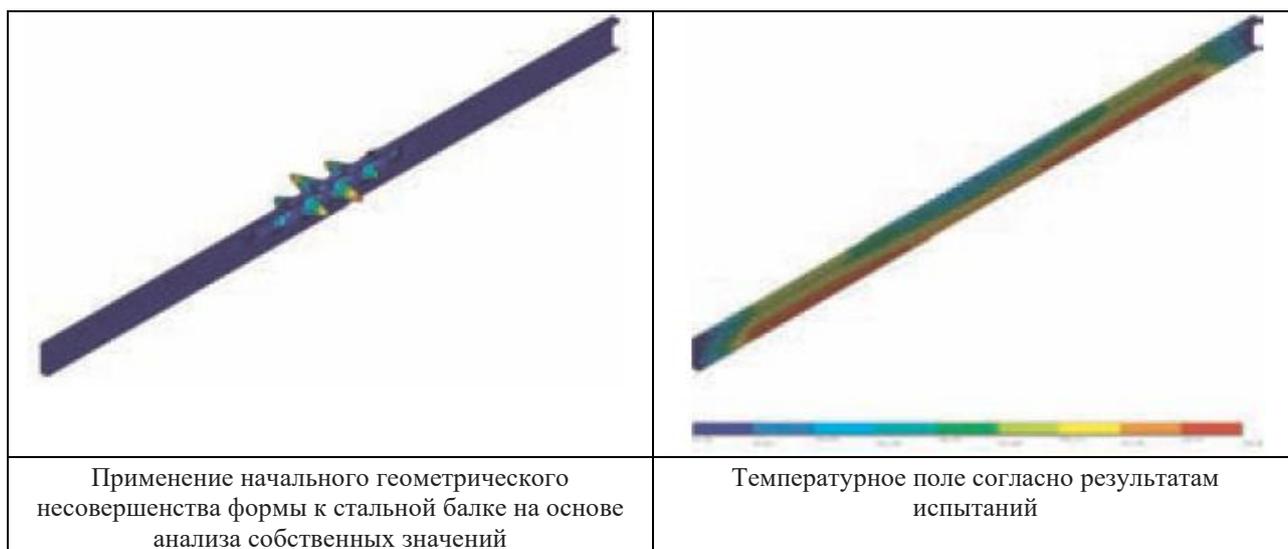


Рисунок 6-15. Применение начального геометрического несовершенства и температурного поля к стальным балкам

### 6.3.2 Сравнение результатов числового моделирования с результатами испытаний

Представленные выше результаты числового моделирования впоследствии применяют для моделирования поведения балок перекрытия. На рисунке 6-16 показано сравнение числовых расчетов и экспериментальных результатов для двух систем конструкций. Из рисунка видно, что результаты практически совпадают не только в части прогиба, но и времени разрушения. Полученное точное совпадение результатов сравнения говорит о том, что численное моделирование с использованием усовершенствованных расчетных моделей позволяет полностью прогнозировать механические характеристики балок, подвергшихся воздействию огня. Следует отметить, что балки подвергаются только прогибу, и теоретически их характеристики менее сложные по сравнению с характеристиками стоек, которые одновременно подвергаются изгибу и потере устойчивости. Тем не менее,

хорошие результаты численного моделирования еще раз подтверждают правильность используемой модели материала.

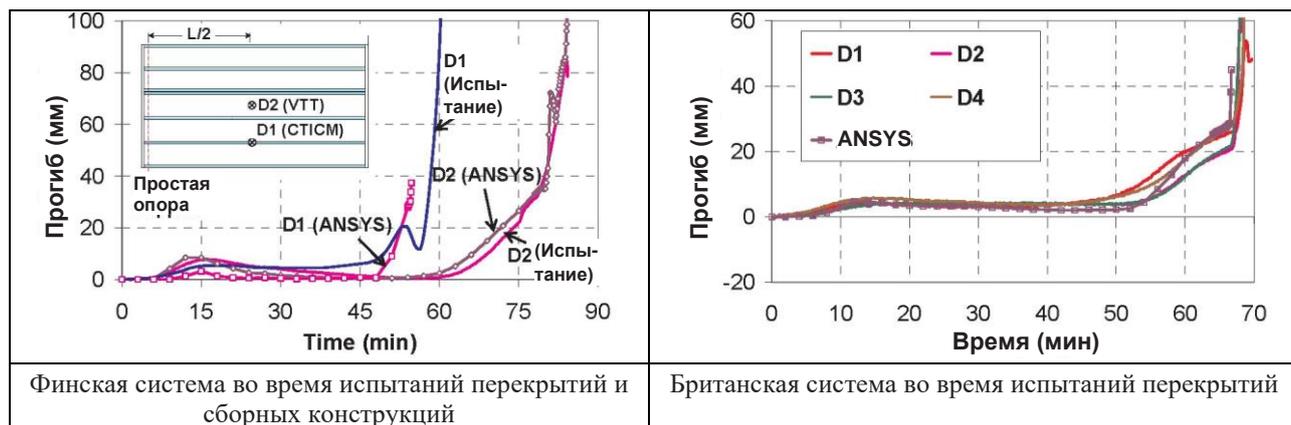
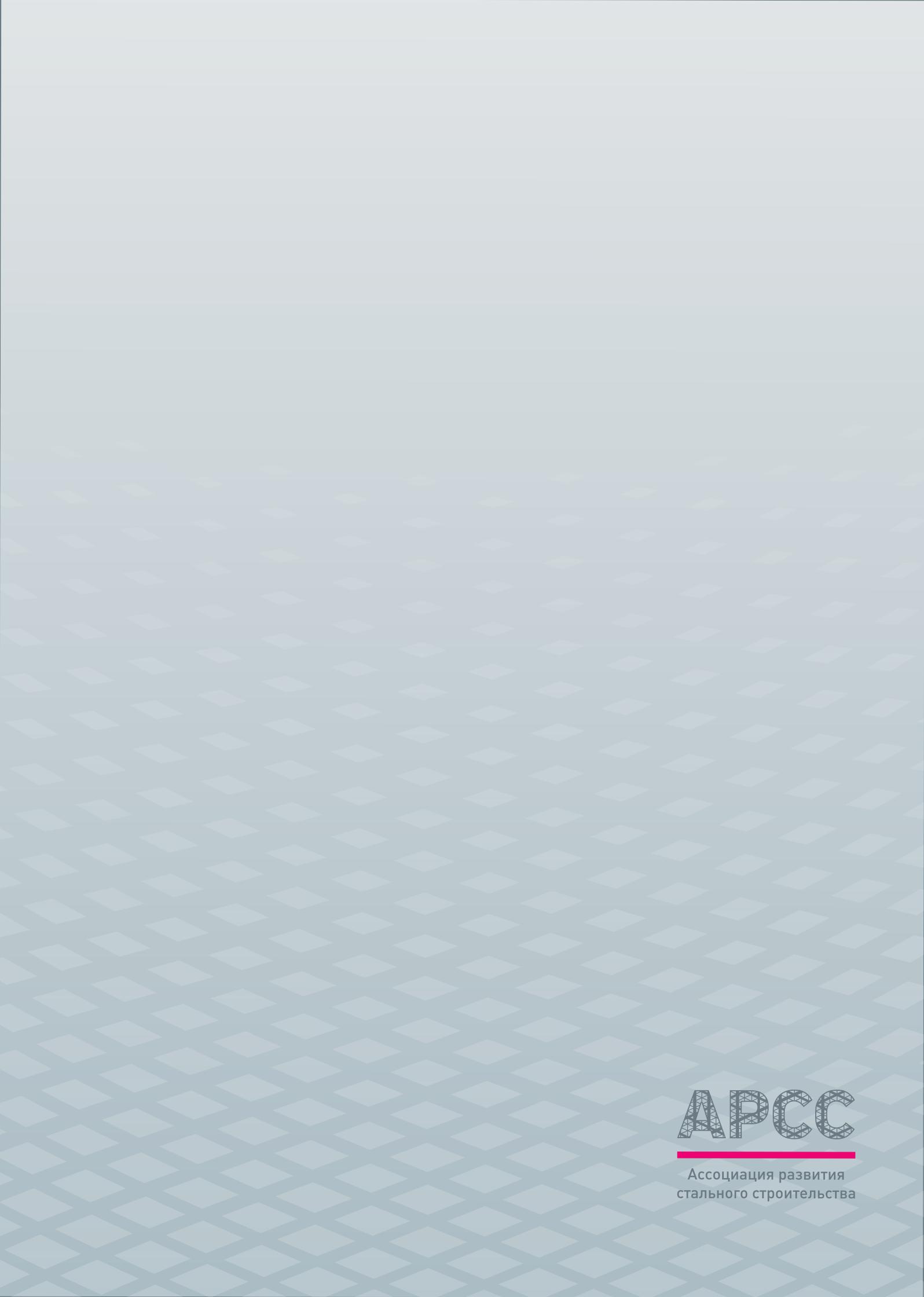


Рисунок 6-16. Сравнение результатов численного моделирования с результатами испытаний на прогиб перекрытия

## 6.4 ВЫВОДЫ

Данные в этой главе в основном касаются характеристик огнестойкости конструкций с холодногнутыми легкими стальными панелями, например, перекрытий, стен и их сборных конструкций. В первую очередь, упор делается на экспериментальные исследования, основанные на нескольких типах испытаний двух европейских систем легких стальных конструкций на огнестойкость. Кроме вышеупомянутых экспериментальных работ было проведено численное моделирование для анализа характеристик перекрытий в условиях пожара. Результаты, полученные во время этих исследований, позволяют сделать следующие выводы:

- стеновые панели ведут себя так же, как отдельные стойки, поддерживаемые плитами;
- огнестойкость плит перекрытий напрямую связана с эксплуатационными характеристиками гипсокартонных плит;
- характеристики гипсокартонных плит у соединения перекрытия со стеной во время испытания сборной конструкции были удовлетворительными, и при испытаниях на огнестойкость не было выявлено никаких нарушений;
- падение гипсокартонных плит для плит перекрытий происходило всегда. Однако первое падение произошло со стороны простой опоры, вероятно, из-за более сильного прогиба опорных стальных балок;
- если обрушение системы «перекрытие-стена» произошло из-за разрушения плиты перекрытия, то режим разрушения очень похож на режим разрушения отдельной плиты перекрытия;
- разрушение может произойти из-за местного смятия стальных балок вследствие высокой нисходящей нагрузки от перекрытий, поэтому необходимо уделять внимание расчету местного сопротивления балок при сосредоточенной нагрузке;
- численное моделирование позволяет точно предсказать характеристики огнестойкости балок перекрытия.



АРСС

---

Ассоциация развития  
стального строительства