

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 69.035.4:711.7

РАСЧЕТ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЙ

д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ, А.В. ПОПРАВКО
(Полоцкий государственный университет),
д-р техн. наук, проф. Т.М. ПЕЦОЛЬД
(Белорусский национальный технический университет, Минск),
В.Ю. ЖУРАВСКИЙ
(РУП «Белгосэкспертиза Минстройархитектуры», Минск)

Представлены результаты компьютерного моделирования поведения большепролетных металлических конструкций покрытий сооружений в случае аварийных воздействий, вызвавших локальные разрушения отдельных элементов несущих конструкций. Выявлено положительное влияние пространственной работы несущих конструкций покрытия при учете совместной работы связей, неразрезных прогонов и плоских элементов покрытия при восприятии аварийных воздействий. Показана важная роль связей, особенно вертикальных, в перераспределении усилий при локальном разрушении. Для повышения устойчивости конструкций покрытия против прогрессирующего обрушения целесообразно предусматривать дополнительные конструктивные меры, исключающие возможность потери устойчивости отдельных элементов, в виде ребер жесткости или центрирующих опорных подкладок по оси фермы в месте опирания прогонов.

Введение. Проектирование зданий и сооружений предусматривает длительный срок их эксплуатации в нормальных условиях и при надлежащем уходе за конструкциями. На работоспособность строительных конструкций и их отказы в работе кроме повреждений, накапливающихся в процессе эксплуатации, могут оказывать влияние и чрезвычайные воздействия – сейсмические воздействия, опасные метеорологические явления, пожары, взрывы снаружи и внутри сооружений, значительные дефекты материалов и производства работ и др. Возникновение чрезвычайных воздействий полностью исключить невозможно – следует стремиться к минимизации последствий этих воздействий.

Основная часть. Последствия аварий большепролетных конструкций покрытий являются наиболее разрушительными. Поэтому уже на стадии их проектирования следует обеспечить безопасность находящихся в сооружениях людей и сохранность имущества за счет снижения вероятности прогрессирующего (лавинообразного, цепного и др.) обрушения при локальных разрушениях отдельных несущих элементов. Эти локальные разрушения не должны приводить к разрушению соседних несущих элементов, воспринимающих дополнительные усилия при измененной конструктивной схеме их работы. Устойчивость сооружений против прогрессирующего обрушения должна обеспечиваться конструктивными и профилактическими мероприятиями и проверяться расчетом.

В деле предупреждения аварий эксплуатируемых металлических конструкций согласно [1] важное значение имеет служба эксплуатации и надзора за несущими конструкциями, усиление конструкций и сопутствующее ему регулирование напряжений в элементах, выявление неучтенных запасов прочности, улучшение методик расчета строительных конструкций.

В работе [2] предлагается три способа предупреждения прогрессирующего обрушения строительных конструкций: общее упрочнение всего сооружения, местное усиление отдельных элементов и конструктивная взаимосвязь элементов.

Известен ряд документов, определяющих правила проектирования для предотвращения прогрессирующего обрушения конструкций зданий [3, 4], а также «Рекомендации...», разработанные МНИИТЭП и НИИЖБ, утвержденные Москомархитектуры в 2005 году. В случае возникновения чрезвычайных воздействий на отдельные элементы, не предусмотренные условиями нормальной эксплуатации здания, его конструктивная схема должна обеспечивать прочность и устойчивость как минимум на время, необходимое для эвакуации людей.

В основу расчета применительно к металлическим конструкциям положены следующие предпосылки:

- расчет производится на особое сочетание нагрузок и воздействий, включающее постоянные и временные длительные нагрузки согласно [5] при коэффициентах сочетаний нагрузок и коэффициентах надежности по нагрузкам, равным 1, а также одно из гипотетических воздействий на конструкции в виде исключения из расчета отдельных несущих элементов;

- для учета эффекта падения обрушившихся конструкций при внезапном исключении отдельных несущих элементов вводятся коэффициенты динамичности для постоянных и временных нагрузок, попадающих в сектор обрушения;

- расчетные характеристики материалов конструкций принимаются равными их нормативным значениям согласно [6], без учета коэффициентов условий их работы;

- обеспечение пластичной работы конструктивной системы в результате применения пластичных сталей, допустимость работы сталей за пределом текучести;

- перемещения конструкций при чрезвычайных воздействиях не ограничиваются.

Поверочные расчеты на прогрессирующее обрушение были проведены для металлических большепролетных конструкций покрытий сооружений конькобежного стадиона и велодрома многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-Арена»¹ в г. Минске [7, 8] и ледового дворца на 7000 мест в г. Бобруйске, запроектированных ЗАО «Белпроектстальконструкция» г. Минска [9].

Конструкции покрытий *конькобежного стадиона и велодрома многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-Арена» в г. Минске* однотипны и представляют собой в плане овал шириной (максимальным пролетом) 86 м и длиной соответственно 198,5 и 115 м без температурных швов. В обоих сооружениях отметка низа несущих конструкций покрытия, опирающихся на железобетонный каркас, составляет 12,84 м; отметка верха покрытия переменная из-за изменения высоты несущих конструкций с уменьшением их пролетов к торцам здания.

Несущие большепролетные конструкции обоих покрытий запроектированы в виде однопролетных двухшарнирных арок с опорными узлами из листовой стали и затяжками с шагом 7,5 м, опирающимися на предварительно выверенные шарнирные опоры, обеспечивающие возможность их поворота. С целью уменьшения влияния температурных воздействий с одной из сторон сооружения конструкция опор обеспечивает также возможность всестороннего горизонтального перемещения. Пояса арок запроектированы из сварных коробчатых сечений, решетка – из гнутосварных замкнутых профилей, а затяжки – из сварного двутавра на подвесках из гнутосварных замкнутых профилей. С целью исправления погнутостей, линейных отклонений при монтаже и более эффективного включения в работу проектом предусмотрено предварительное напряжение затяжек арок с помощью высокопрочных болтов в соединительном фланце в середине их пролета. Конструктивная схема несущих арок покрытия представлена на рисунке 1.

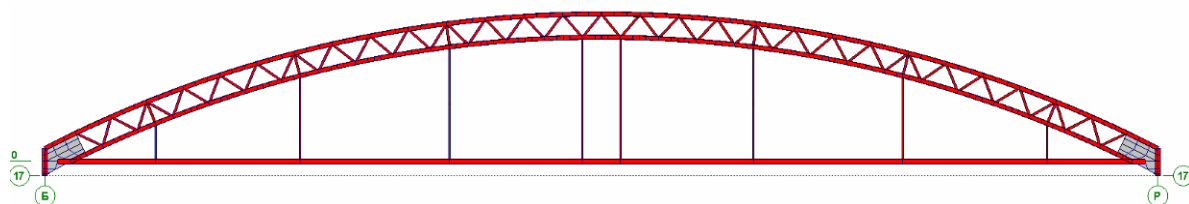


Рис. 1. Конструктивная схема несущих конструкций покрытия конькобежного стадиона и велодрома многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-Арена» в г. Минске

Пространственная устойчивость плоских несущих конструкций обеспечивается неразрезными решетчатыми прогонами покрытия, а также системой горизонтальных (в уровне верхнего пояса) и вертикальных (по двум линиям в пролете и у опор арок) связей из гнутосварных замкнутых профилей.

На решетчатые прогоны, установленные с шагом 3 м, с помощью самонарезающихся винтов и комбинированных заклепок крепится стальной профилированный настил покрытия, воспринимающий постоянные и временные нагрузки; настил рассчитан по неразрезной трехпролетной схеме.

Конструктивные схемы покрытий конькобежного стадиона и велодрома многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-Арена» в г. Минске представлены соответственно на рисунке 2, а и рисунке 2, б.

Согласно проектной документации покрытие *ледового дворца на 7000 мест в г. Бобруйске* представляет собой систему плоских стальных раскосных ферм пролетом 44,2...72 м, установленных с шагом 6 м (крайние – 7,2 м), без температурных швов. Фермы, выполненные из спаренных равнополочных уголков, шарнирно опираются верхним поясом на стальные колонны. Конструктивная схема несущих ферм покрытия ледового дворца показана на рисунке 3; на верхние пояса ферм с шагом 3 м шарнирно опираются стальные прогоны из гнутосварных замкнутых профилей, работающие по разрезной схеме. Стальной профилированный настил покрытия крепится к прогонам с помощью самонарезающихся винтов.

Устойчивость покрытия обеспечивается системой горизонтальных (в плоскости верхнего и нижнего поясов ферм) и вертикальных, в виде раскосов, связей. Конструктивная схема покрытия ледового дворца в г. Бобруйске приведена на рисунке 4.

¹ Проект разработан РУП «Ордена Трудового Красного Знамени институт Белгоспроект».

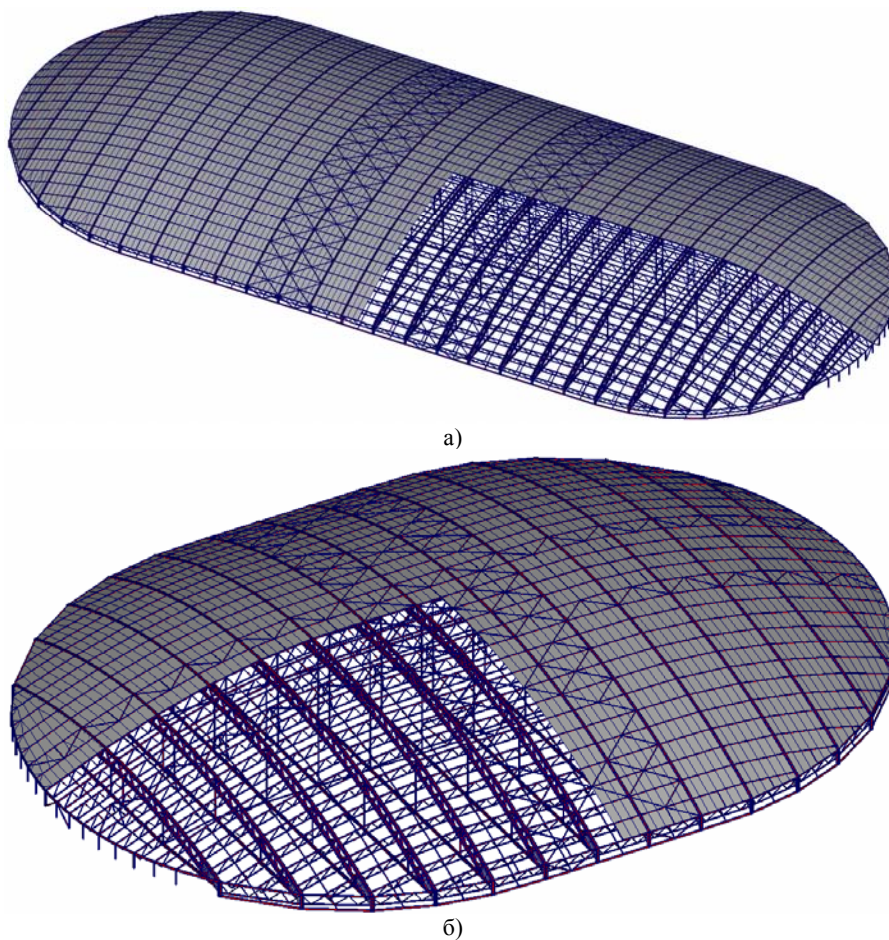


Рис. 2. Конструктивные схемы покрытий:
а – конькобежного стадиона; б – велодрома многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-Арена» в г. Минске

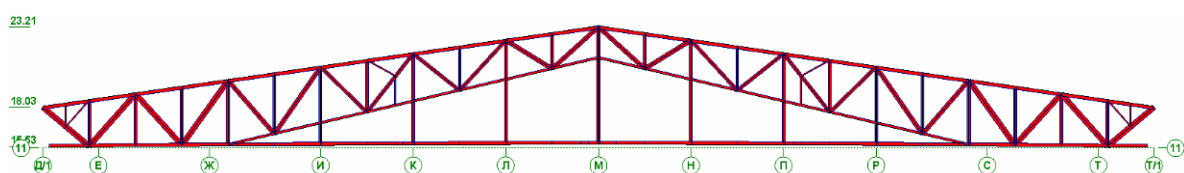


Рис. 3. Конструктивная схема несущих конструкций покрытия ледового дворца на 7000 мест в г. Бобруйске

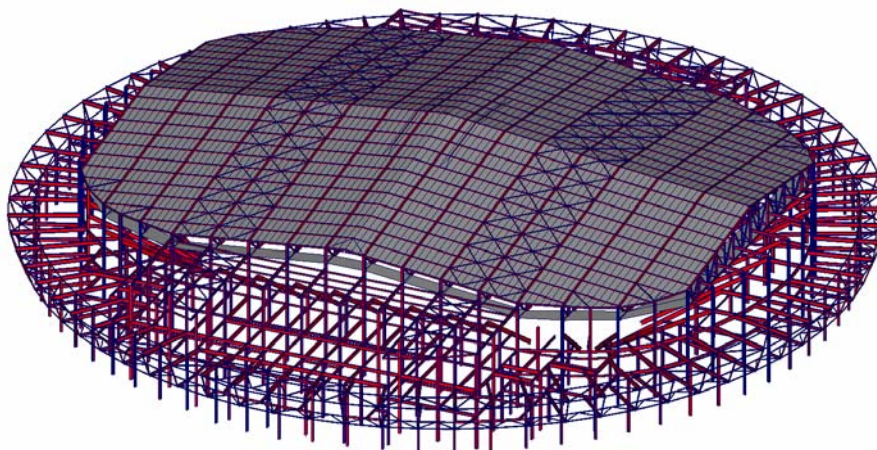


Рис. 4. Конструктивная схема покрытия ледового дворца на 7000 мест в г. Бобруйске

Компьютерное моделирование поведения металлических большепролетных конструкций покрытий названных сооружений в случае чрезвычайных воздействий, вызвавших локальные разрушения отдельных элементов несущих конструкций, выполнялось с применением сертифицированного программного комплекса «SCAD-Office» (Киев, Украина).

Поверочные расчеты конструкций покрытий выполнялись в два этапа:

- на *первом этапе* выполнялась проверка прочности и устойчивости элементов несущих конструкций при действии расчетных сочетаний расчетных нагрузок с учетом коэффициентов сочетаний и коэффициентов надежности: постоянных (собственного веса элементов покрытий) и временных нагрузок (снеговой и ветровой, от веса коммуникаций, оборудования, температурных воздействий). При этом на воздействия вертикальных нагрузок не учитывалась работа связей и стального профилированного настила. В соответствии с результатами поверочных расчетов первого этапа все несущие элементы вышеназванных покрытий соответствуют условиям прочности и устойчивости при действии проектных нагрузок;

- на *втором этапе* расчет конструкций покрытий на прогрессирующее обрушение производился в соответствии с вышеприведенными положениями. В качестве расчетных схем рассматриваемых сооружений в соответствии с рекомендациями [3] использовались пространственные расчетные модели с учетом элементов, которые при нормальных эксплуатационных условиях являются ненесущими, а при наличии локальных разрушений активно участвуют в перераспределении нагрузки (вертикальные и горизонтальные связи, неразрезность прогонов, работа стального профилированного настила по арочной схеме и т.д.). В качестве гипотетического воздействия на несущие конструкции приняты следующие локальные воздействия: для двухшарнирных арок – локальное разрушение затяжек; для раскосных ферм – локальное разрушение опорных раскосов, в результате которых они освобождаются на одной из опор от связей и передают нагрузку на соседние элементы покрытия.

На рисунке 5 показан участок расчетной схемы покрытия сооружения ледового дворца на 7000 мест в г. Бобруйске при аварийных воздействиях на одну из несущих конструкций покрытия.

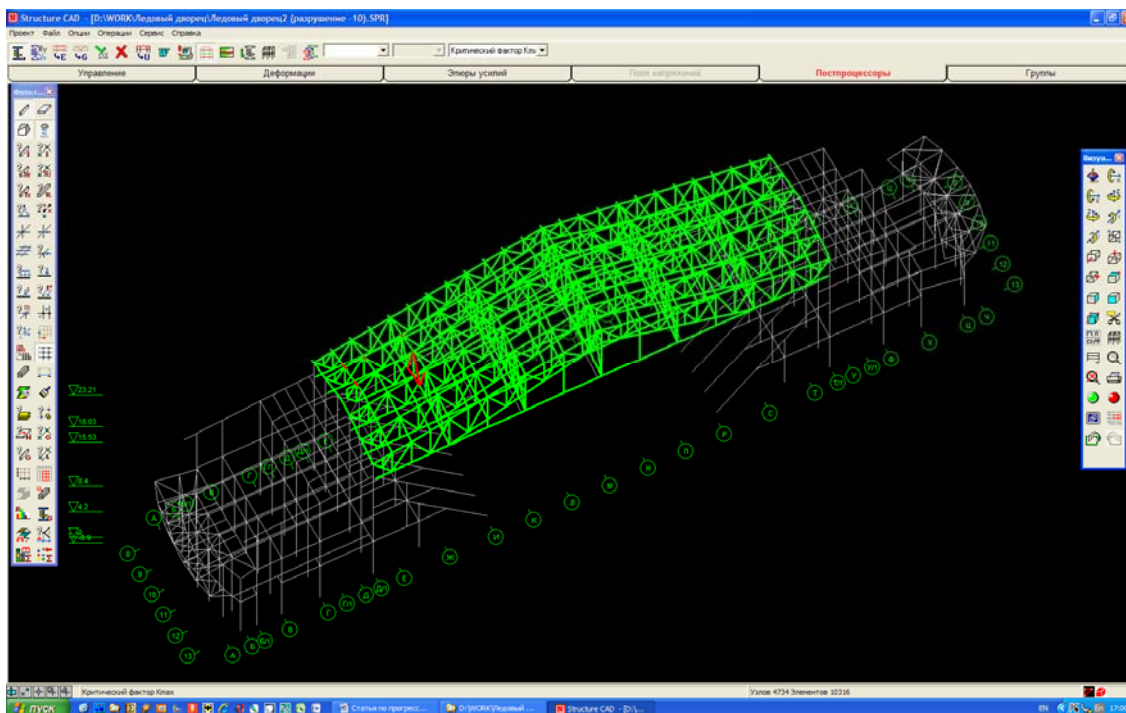


Рис. 5. Результаты проверки прочности и устойчивости элементов покрытия при действии аварийных нагрузок ледового дворца на 7000 мест в г. Бобруйске

Важную роль в перераспределении усилий при локальном разрушении играют связи, особенно вертикальные. В результате поверочных расчетов второго этапа были существенно увеличены их поперечные сечения, которые в сочетании с работой неразрезных прогонов и стального профилированного настила в продольном направлении (вдоль волн) позволяют конструкции покрытия с измененной расчетной схемой воспринимать аварийные нагрузки.

В таблицах 1 – 3 приведены результаты расчета на прогрессирующее обрушение с учетом последовательного локального разрушения отдельных элементов и последующего подбора сечений элементов, прочность и устойчивость которых недостаточна для восприятия аварийных нагрузок.

Таблица 1

Результаты расчета на прогрессирующее обрушение ледового дворца на 7000 мест в г. Бобруйске

Конструктивный элемент	Исходное сечение	Результат подбора
Разрушение опоры фермы ФС1 по оси «10»		
Связи СВ2 ряды «Ж/И» «Р/С»	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 120×4	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 160×6
Связи БР3 ряды «Ж/И» «Р/С»	Стальные гнутые замкнутые сварные прямоугольные профили по ГОСТ 30245-2003 140×100×4	Стальные гнутые замкнутые сварные прямоугольные профили по ГОСТ 30245-2003 160×100×5
Разрушение опоры фермы ФС1 по оси «9»		
Связи БР3 ряды «Ж/И» «Р/С»	Стальные гнутые замкнутые сварные прямоугольные профили по ГОСТ 30245-2003 160×100×5	Стальные гнутые замкнутые сварные прямоугольные профили по ГОСТ 30245-2003 180×140×8
Разрушение опоры фермы ФС1 по оси «8»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение опоры фермы ФС1 по оси «7»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение опоры фермы ФС1 по оси «6»		
Связи СВ1 ряды «Ж/И» «Р/С»	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 120×4	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 160×6
Разрушение опоры фермы ФС2 по оси «5»		
Связи БР2 ряды «Ж/И» «Р/С»	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 140×5	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 160×6
Стойки фермы ФС2 на расстоянии 18,7 м от опор	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L80×6	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L100×7
Раскосы фермы ФС2 на расстоянии 18,7 м от опор	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L100×7	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L140×10
Разрушение опоры фермы ФС3 по оси «4»		
Стойки опорной панели ферм ФС3	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L160×12	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L160×20
Связи СГ1 в осях «3 – 4» «17 – 18»	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 120×4,5	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 140×5
Связи СВ3 в осях «3 – 4» «17 – 18»	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 120×4	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 160×5
Прогоны П1 в осях «3 – 4» «17 – 18» «Д-Ж» «С-У»	Стальные гнутые замкнутые сварные прямоугольные профили по ГОСТ 30245-2003 200×160×6, 200×160×8	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 200×12
Разрушение опоры фермы ФС4 по оси «3»		
Раскосы опорной панели ферм ФС3	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L80×6	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L90×6
Стойки фермы ФС3 на расстоянии 6,32 м от опор	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L80×6	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L125×8
Раскосы фермы ФС3 на расстоянии 15,32 м от опор	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L100×7	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L160×12
Связи СВ6 ряда «К» и «П» (решетка, верхний пояс)	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 100×4, 120×4	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 140×5
Связи СВ6 ряда «К» и «П» (нижний пояс)	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 140×5	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 200×12
Связи СВ5 ряда «К» и «П» (нижний пояс)	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 120×4	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 160×6
Связи СВ3 в осях «3 – 4» «17 – 18»	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 160×5	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 160×6

Таблица 2

Результаты расчета на прогрессирующее обрушение велодрома многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-Арена» в г. Минске

Конструктивный элемент	Исходное сечение	Результат подбора
1	2	3
Разрушение участка затяжки по оси «40»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «39»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		

Окончание табл. 2

1	2	3
Разрушение участка затяжки по оси «38»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «37»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «36»		
Связи РС1 (в местах примыкания к РС3 в осях «34 – 35» и «46 – 47» по оси «Р»)	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили 100×7,5 по ГОСТ 30245-2003	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили 160×8 по ГОСТ 30245-2003
Разрушение участка затяжки по оси «35»		
Верхний пояс прогонов покрытия П28	Стальные гнутые замкнутые сварные прямоугольные профили 200×160×8 по ГОСТ 30245-2003	Стальные гнутые замкнутые сварные прямоугольные профили 240×160×11 по ГОСТ 30245-2003
Разрушение участка затяжки по оси «34»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		

Таблица 3

Результаты расчета на прогрессирующее обрушение конькобежного стадиона и велодрома многопрофильного культурно-спортивного комплекса «Минск-Арена» в г. Минске

Конструктивный элемент	Исходное сечение	Результат подбора
Разрушение участка затяжки по оси «15»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «14»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «13»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «12»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «11»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «10»		
Связи СВ1 (вертикальные торцевые)	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили 120×4 по ГОСТ 30245-2003	Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили 120×8 по ГОСТ 30245-2003
Разрушение участка затяжки по оси «9»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «8»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «7»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «6»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «5»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «4»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		
Разрушение участка затяжки по оси «3»		
Устойчивость покрытия против прогрессирующего обрушения обеспечена		

Кроме увеличения поперечного сечения связей и прогонов, эффективно передающих дополнительные усилия на соседние несущие конструкции, для повышения устойчивости конструкций покрытия против прогрессирующего обрушения целесообразно предусматривать дополнительные конструктивные меры, исключающие возможность потери устойчивости отдельных элементов (например, при местном изгибе горизонтальных полок спаренных уголков верхнего пояса ферм при пластическом деформировании поперечных прогонов с изгибом), в виде ребер жесткости или центрирующих опорных подкладок по оси фермы в месте опирания прогонов.

Заключение. Произведенные поверочные расчеты и подбор сечений несущих элементов большепролетных покрытий в случае аварийных воздействий, вызвавших локальные разрушения отдельных элементов несущих конструкций, позволили выявить важную роль связей, неразрезности прогонов, эффективную работу стального профилированного настила в продольном направлении (при закреплении прогонов и листов между собой) в восприятии аварийных воздействий, а также незначительные дополнительные расходы металла (до 1,5...2 % от исходного собственного веса металлоконструкций) для обеспечения устойчивости конструкций покрытий против прогрессирующего обрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лашенко, М.Н. Повышение надежности металлических конструкций зданий и сооружений при реконструкции / М.Н. Лашенко. – М.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 136 с.
2. Новые функции ПК «SCAD» версии 11.1. – Киев, 2006. – 37 с.
3. Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях / Г.И. Шапиро [и др.]. – М.: МНИИТЭП, 2002. – 11 с.
4. Жилые и общественные высотные здания: ТСН 31-332-2006. – СПб., 2006.
5. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85. – М., 1996.
6. Стальные конструкции: СНиП II-23-81*. – М., 1996.
7. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций покрытия конькобежного стадиона культурно-спортивного комплекса «Минск-Арена»: науч.-техн. отчет / Белорус. нац. техн. ун-т (МОЦ); Полоц. гос. ун-т. – Минск, 2007. – 32 с.
8. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций покрытия велодрома культурно-спортивного комплекса «Минск-Арена»: науч.-техн. отчет / Белорус. нац. техн. ун-т (МОЦ); Полоц. гос. ун-т. – Минск, 2007. – 26 с.
9. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций покрытия ледового дворца на 7000 мест в г. Бобруйске: науч.-техн. отчет / Белорус. нац. техн. ун-т (МОЦ); Полоц. гос. ун-т. – Минск, 2007. – 25 с.

Поступила 20.05.2007