

УДК 624.072.33

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ШЕСТИГРАННОГО СЕЧЕНИЯ

Перминов Д.А.

ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»
Институт «Академия строительства и архитектуры»
295493 Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181
E-mail: dmitriy714@mail.ru;

Аннотация: В статье рассматриваются узлы из гнутых профилей шестигранного сечения. Выполнен анализ распределения напряжений в элементах узла для двух конструктивных решений. Рассмотрен характер разрушения узлов.

Предмет исследования: Т-образные узлы, в которых сечение ригеля было значительно меньшим, чем сечение стойки. Было рассмотрено два типа узлов. Первый тип: с примыканием ригеля к сквозной (без выреза) стойке через специальную пластинку. Второй тип: с непосредственным примыканием ригеля к сквозной стойке и усилением узла двумя подкосами.

Материалы и методы: Расчет напряженно-деформированного состояния моделей узлов рамного каркаса выполнен с помощью ПК «ЛИРА-САПР», теоретической основой которой является метод конечных элементов, реализованный в форме перемещений.

Результаты: По результатам расчета в упругой стадии были получены данные о распределении продольных напряжений в наиболее напряженных сечениях элементов узла.

Выводы: Результаты исследования рамных узлов показали, разрушение узлов происходило или из-за образования трещин, или из-за потери местной устойчивости пластинками узлов. Разрушение всех узлов происходило после образования пластических зон, т.е. в упругопластической стадии работы узла. Также исследования узлов позволили оценить эффективность усиления узлов различными конструктивными элементами или их сочетаниями.

Ключевые слова: рамные узлы, замкнутый гнутый профиль шестигранного сечения, напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывно расширяющееся применение металла в строительных конструкциях связано с внедрением в практику строительства новых конструктивных форм и профилей металла. Рамные конструкции, достаточно широко использующиеся в качестве стальных каркасов зданий и сооружений, традиционно имели в основном двутавровое сечение. В последние годы в практику строительства во всё большей степени внедряются рамные конструкции, выполненные из стержней коробчатого сечения. Намечившаяся тенденция к использованию в таких конструкциях, замкнутых гнутосварных профилей объясняется их преимуществами не только перед традиционными горячекатаными, но и перед цилиндрическими трубчатыми профилями.

Основными преимуществами применения конструкций из замкнутых гнутых профилей, являются следующие: более рациональное распределение металла по сечению, связанное с характерным для замкнутых гнутых профилей наибольшим коэффициентом рациональности формы сечения и наименьшей удельной толщиной стенки; возможность более рационального, чем в открытых профилях, использования высокопрочных сталей; повышенная стойкость против коррозии; возможность встраивать конструкции из замкнутых гнутых профилей в качестве элементов современного интерьера благодаря их привлекательному внешнему виду; возможность изготовления профилей нетрадиционной конфигурации; по сравнению с цилиндрическими трубами прямоугольные замкнутые гнутые профили проще в обработке и при

компоновке узлов конструкций, их жесткость на кручение выше.

Вместе с тем, работа узлов стержневых конструкций из замкнутых гнутых профилей, особенно рамных узлов, изучена недостаточно.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Сквозные строительные конструкции, стержни которых выполнены из замкнутых гнутых профилей, принципиально ничем не отличаются от традиционных конструкций из горячекатаных профилей. Однако у них есть ряд особенностей, вытекающих из их геометрических характеристик и связанных прежде всего с их тонкостенностью.

Необходимость изучения действительной работы таких узлов привела к тому, что выполнено значительное количество исследований по изучению узлов из замкнутых гнутых профилей, в том числе работы И.В. Левитанского и др., Г.И. Кекса, Э.Ф. Гарфа, В.И. Новикова, В.А. Балдина и Н.М. Шейнфельда, Богданди, К. Силаши.

Все эти работы посвящены узлам, в которых стержни работают на центральную нагрузку (растяжение или сжатие).

Работа Шейнфельда является одной из первых, в которой описываются узлы в фермах, созданных ЦНИИСКом, ЦНИИпромзданий, ЦНИИПСК и Укрпроектстальконструкцией.

В работе И. В. Левитанского и др. приведены результаты испытания узлов стропильной раскосной фермы, выполненных из замкнутых прямоугольных гнутых профилей с примыканием к поясу сжатого и растянутого раскосов К-образных узлам. Исследовались узлы с непосредственным

примыканием раскосов к поясу и узлы с различными видами усиления, выполненными таким образом, чтобы передать нагрузку от раскосов на большую часть периметра сечения пояса в узле. Применение этих усиленных увеличило несущую способность узлов в среднем на 15%

В работах Гарфа и Новикова приводятся результаты исследования узлов ферм с примыканием одного, двух и более элементов решетки к поясу. Выявлены два основных вида разрушения узла:

- 1) местное деформирование вертикальных стенок пояса;
- 2) разрушение раскоса по зоне примыкания к поясу.

Определены также основные факторы, влияющие на несущую способность узла:

- 1) полуразность в ширине пояса и раскосов;
- 2) толщина стенки пояса;
- 3) угол наклона раскоса к поясу;
- 4) размер продольных стенок раскоса.

На основании проведенных экспериментов были получены графики и эмпирические зависимости для расчета узлов такого типа.

В работе Г.И. Кекса приведены данные о испытании узлов с примыканием одного и двух элементов. Полученные данные в основном подтверждают результаты И.В. Левитанского и Э.Ф. Гарфа.

В работе К. Силаши также исследовались рамы с примыканием одного и двух элементов к поясу и получены аналогичные результаты.

В работе Богданди приводятся примеры различных узлов из замкнутых профилей, которые могут быть применены не только в фермах, но и в рамных конструкциях. Некоторые из этих узлов представляют несомненный интерес. Так, например, показан узел, пояс которого представляет собой замкнутый прямоугольный профиль, а раскосы – круглые полые профили.

Кроме описанных выше исследований интерес представляют исследования, проведенные западногерманской фирмой «Маннесман».

Исследовались узлы ферм, в которых усилия направлены по осям стержней, и рамные узлы, работающие на поперечный изгиб.

В работе Мехротра приведены рекомендации по конструированию Г-образных узлов с соединением ригеля и стойки со скосом их под углом 45° («на ус»), с применением подкосов из гнутого профиля, с применением диафрагмы, а также данные по испытанию Т-образных узлов с подкосами и без подкосов. Вводится понятие о коэффициенте прочности узла. Коэффициент прочности принимается равным отношению напряжения в растянутом раскосе (для решетчатых конструкций) при появлении текучести в узле к пределу текучести. Приводятся значения прочности для некоторых частных случаев.

Общие указания по конструированию узлов сводятся к следующему:

1) Для примыкающих профилей (диагонали, раскосы, ригели) следует выбирать наименьшую толщину стенки при большем периметре.

2) Для сквозных профилей (пояса, стойки) выгодна повышенная толщина стенки.

3) Угол примыкания должен быть не менее 30° .

4) Толщина стенок должна быть не менее 2.9 мм.

5) Отношение ширины примыкающего профиля к ширине стойки или пояса должно быть не менее 0.4.

Однако полученные в этой работе данные не являются достаточно проверенными и обоснованными.

Таким образом, в проведенных исследованиях узлов из гнутых профилей (за исключением выполненных фирмой «Маннесман») фактически не изучалась работа рамных узлов, а исследования, проведенные фирмой «Манесманн», относятся к очень ограниченному сортаменту профилей и носят чисто эмпирический характер.

Исследования коробчатых сечений посвящен ряд работ, в том числе работы Р.Де Бёра, К. Клёппеля и др., Э. Рейсснера, Дж. Хаджи-Арджириса и Г.Л. Кокса, Дж. Хорсвилла, С.А. Ильясевича.

В работах Р.Де Бёра, К.Клёппеля, Э. Рейсснера, Дж. Хорсвилла приводятся результаты исследований коробчатых металлических стержней, причем особое внимание обращено на неравномерность распределения напряжений по периметру сечения. Неравномерность распределения нормальных напряжений в горизонтальных гранях полого коробчатого сечения вызывается так называемым «запоздалым сдвигом». Сущность этого явления сводится к тому, что боковые пластинки коробчатого сечения препятствуют сдвигу других пластинок стержня, а это ведет к накоплению напряжений на участках сечения, примыкающих к боковым пластинкам.

Математическое описание этого явления дано Э. Рейсснером, который, исходя из предпосылки о параболическом распределении продольных напряжений в горизонтальных гранях сечения коробчатой балки, предложил дифференциальное уравнение, связывающее прогибы точек горизонтальных пластинок с изгибающими моментами и геометрическими характеристиками. Исходя из этого дифференциального уравнения, автор получил значения напряжений для некоторых частных случаев (балка, защемленная по краям, консоль с линейным изменением нагрузки). Решения представлены в виде суммы двух слагаемых: первое слагаемое представляет собой решение элементарной теории сопротивления материала, второе слагаемое – поправка, учитывающая влияние «запоздалого сдвига».

В работе Г. Л. Кокса решается аналогичная задача, но другим методом (в рядах), и решение не доводится до практического результата.

В работах Р. Д. Бёра и К. Клёппеля предлагается заменить фактическую площадь поперечного сечения с параболическим распределением напряжений эквивалентной площадью с прямолинейным распределением напряжений максимальной величины.

В работе Р. Д. Бёра эта задача решается для коробчатой балки на двух опорах, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой.

В работе К. Клёппеля рассматривается сжато-изогнутая балка на двух опорах. Здесь параболическое распределение напряжений наблюдается по всем четырем сторонам коробчатого сечения. В этой работе размер эквивалентного участка находится путем решения системы уравнений, связывающих линейные размеры сечения и напряжения.

В работе Ильясевича приводится методика расчета одно- и многосекционных коробчатых сечений на изгиб и кручение применительно к расчету коробчатых металлических мостов. Описываются также результаты экспериментального исследования тонкостенной коробчатой конструкции. Большой интерес представляют эпюры нормальных напряжений в верхнем листе профиля, максимальные значения которых соответствуют местам установки вертикальных ребер.

Стержни с полигональным замкнутым поперечным сечением имеют пока незначительное применение: в качестве осветительных мачт. В качестве элементов рамных конструкций такие стержни не использовались. В то же время, конструкции из стержней полигонального сечения несомненно заслуживают внимания, т.к. соединяют в себе качества конструкций с прямоугольным и круглым полым поперечным сечением.

Как видно из приведенного выше обзора работ, неравномерность распределения напряжений исследовалась многими авторами.

При исследовании работы замкнутого гнутого профиля, представляющего собой частный случай коробчатого сечения, важным является учет свойств криволинейных элементов гнутых профилей (ребер и гофров).

Особенностями гнутых профилей является наличие зон упрочнения в местах, где металл подвергался холодному гнанию, а также одинаковая толщина металла холодногогнутого профилей по всему периметру сечения.

Исходя из выше сказанного, целью исследований является изучение напряженного состояния рамных узлов, выполненных из замкнутых гнутых профилей прямоугольного сечения.

Задачами исследования являются: исследование работы на поперечный изгиб рамных узлов, выполненных из замкнутых гнутых профилей; уточнить характер концентрации напряжений в узлах различной конструктивной формы; определить характер распространения зон пластичности в элементах узла; выявить прочностные свойства узлов в зависимости от их конструктивных особенностей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теоретическое исследование распределения напряжений в зонах узловых соединений классическими методами теории упругости весьма затруднительно. Это вызвано разнообразием конструкций узлов, особенностями внешнего нагружения, а также крайне сложным взаимодействием элементов узла. В связи с этим, расчет напряженно-деформированного состояния модели узла рамного каркаса выполнен методом конечных элементов (МКЭ). Теоретической основой ПК «ЛИРА» является МКЭ, реализованный в форме перемещений. Выбор именно этой формы объясняется простотой ее алгоритмизации и физической интерпретации, наличием единых методов построения матриц жесткости и векторов нагрузок для различных типов конечных элементов, возможностью учета произвольных граничных условий и сложной геометрии рассчитываемой конструкции.

Таким образом, для проведения исследования были созданы численные модели узлов (рис. 1, 2).

Узлы выполнялись при каждом типе поперечного сечения в нескольких вариантах конструктивного решения: Т-образные узлы, в которых сечение ригеля было значительно меньшим, чем сечение стойки:

- с примыканием ригеля к сквозной (без выреза) стойке через специальную пластинку;
- с непосредственным примыканием ригеля к сквозной стойке и усилением узла двумя подкосами.

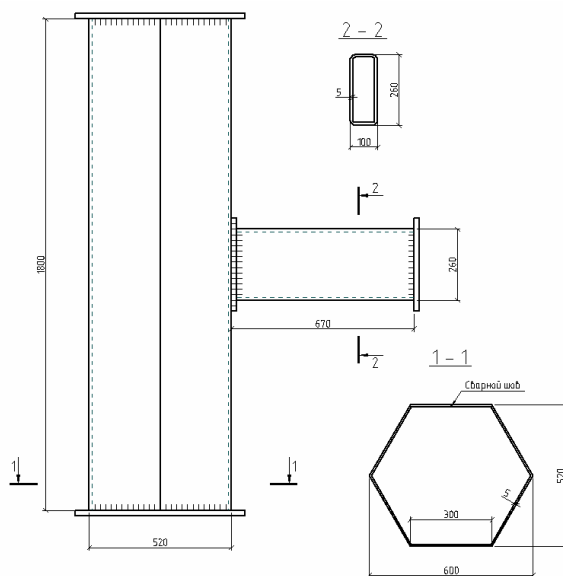


Рис. 1. Узел №1
Fig. 1. Knot No1

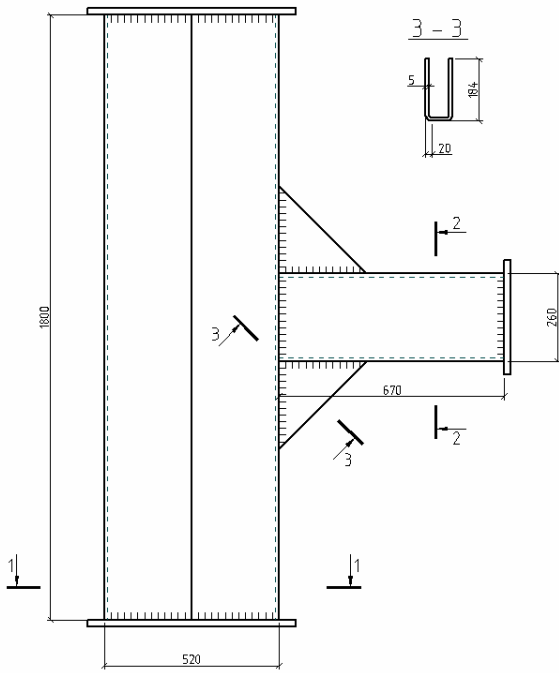


Рис. 2. Узел №2
Fig. 2. Knot No2

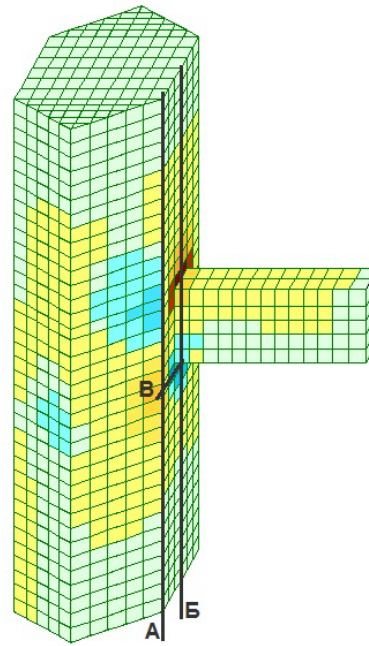


Рис. 3. Мозаика распределение главных напряжений в узле №1
Fig. 3. Mosaic of distribution of main stresses in node No1

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Анализ данных проведенных испытаний показал, что элементы узлов не теряют устойчивости в упругой стадии. Последовательность развития напряженного состояния наблюдалась такая: сначала рост концентрации напряжений в отдельных точках, затем появление пластических деформаций, после этого потеря местной устойчивости или образование трещин в местах концентрации напряжений.

В связи с этим основной проблемой при обеспечении несущей способности узла является не защита его элементов от потери устойчивости (т.к. это уже вторичное явление), а создание таких условий работы, при которых напряжения в узле не достигнут значений предела текучести.

Ниже приводятся данные о распределении продольных напряжений в наиболее напряженных сечениях узла (рис. 3 :- 10). При этом следует учитывать, что на рисунках, показывающих распределение напряжений в испытанных узлах, приведены напряжений, вычисленные для упругой стадии работы металла.

В узле №1 (рис. 3) пластические деформации начались при нагрузке 30 кН. Эпюры при нагрузке 50 кН и 70 кН были показаны для наглядности и для сравнения с узлом усиленным подкосами. Распределение напряжений имеет следующий характер: сначала возникают две полуволны синусоиды, затем одна полуволна, с эпюрой одного знака, знаки эпюр разные – на ребрах и по оси стойки. Пики локализуются по вертикали на расстоянии $28 \div 37$ см от ригеля.

По периметру стойки воздействие ригеля локализуется на двух соседних пластинках.

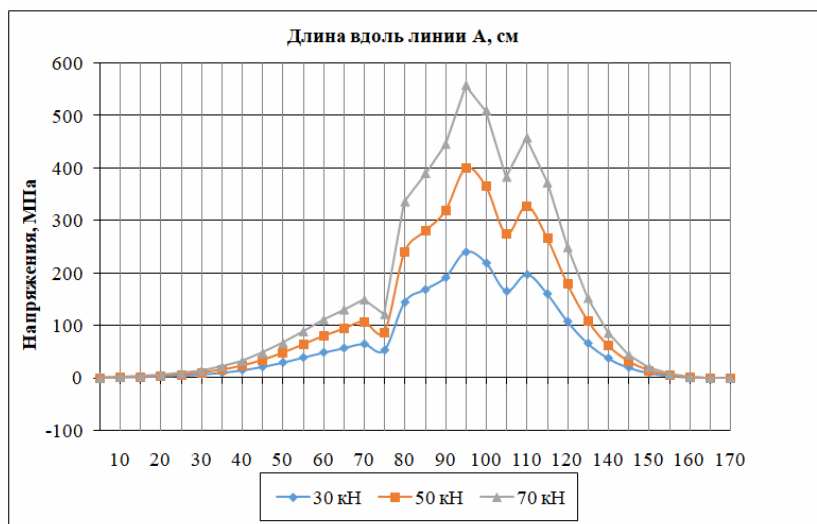


Рис. 4. Эпюра распределения напряжений в узле №1 вдоль линии А
 Fig. 4. Stress distribution diagram σ_x in node No1 along line A

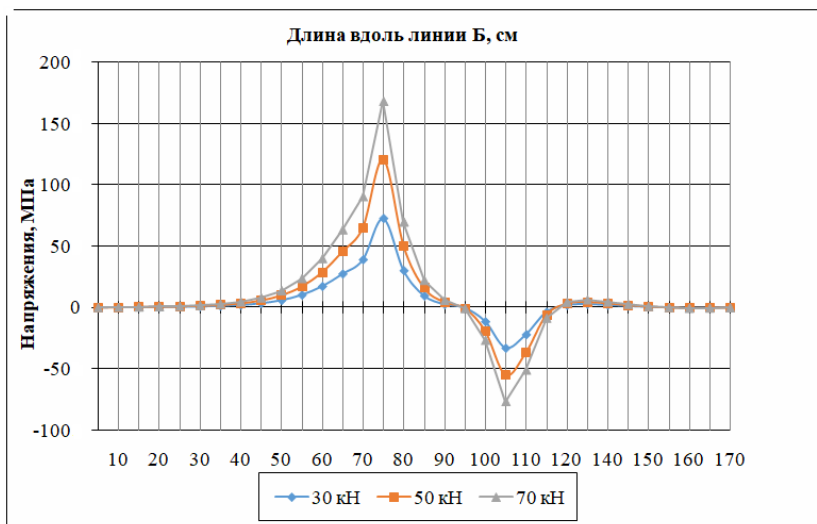


Рис. 5 - Эпюра распределения напряжений в узле №1 вдоль линии Б
 Fig. 5. Stress distribution diagram σ_x in node No1 along line B

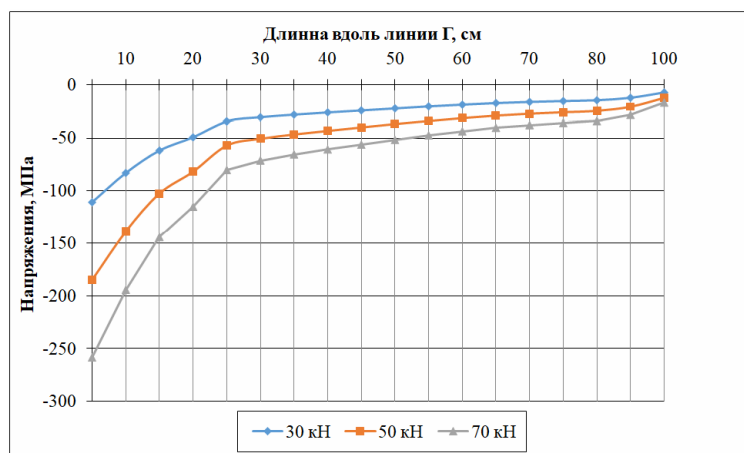


Рис. 6 - Эпюра распределения напряжений в узле №1 вдоль линии В
 Fig. 6. Stress distribution diagram in node No1 along line B

В узле №2 (рис. 7) распределение напряжений аналогично ранним стадиям узла 1. Локализация по периметру такая же, как и у узла 1, а по вертикали на расстоянии 20÷25 см от края подкоса.

Приведенные выше данные пиков напряжений и их локализации кратко показаны в таблице 1.

Из таблицы 1 видно следующее:

- У Т-образных узлов шестигранного сечения ригель воздействует на пластинку, к которой он примыкает, и на две соседние пластинки.

Воздействие на остальную часть сечения незначительно.

- У Т-образных узлов с подкосами пики напряжений расположены у верхнего края верхнего подкоса и у нижнего края нижнего подкоса.

- Величина пиков у Т-образных узлов без подкосов больше, чем у соответствующих узлов с подкосами.

- Величина пиков у Т-образных узлов без подкосов больше, чем у соответствующих с подкосами.

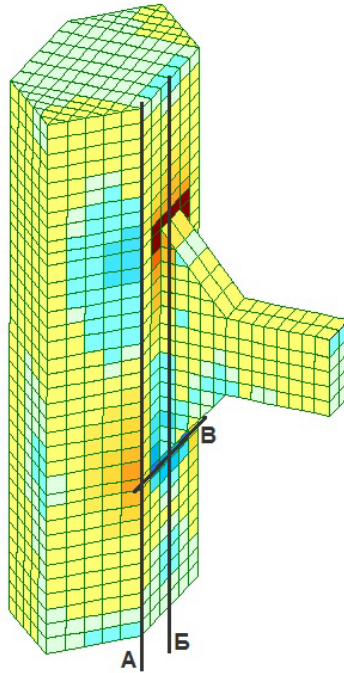


Рис. 7. Мозаика распределение главных напряжений в узле №2
Fig. 7. Mosaic of distribution of main stresses in node No2

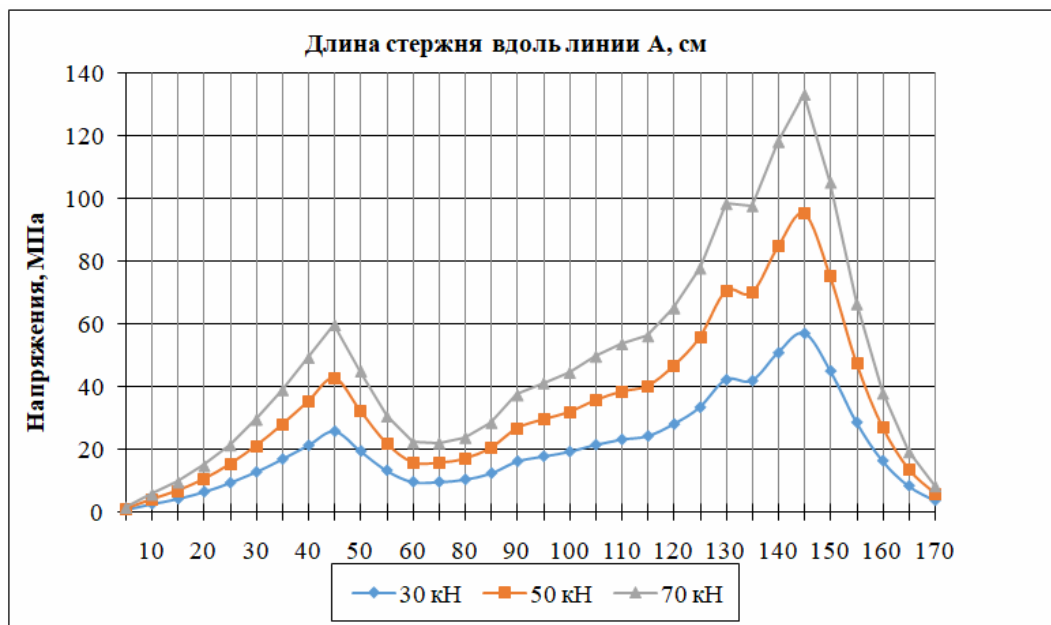


Рис. 8. Эпюра распределения напряжений в узле №2 вдоль линии А
Fig. 8. Stress distribution diagram in node No2 along line A

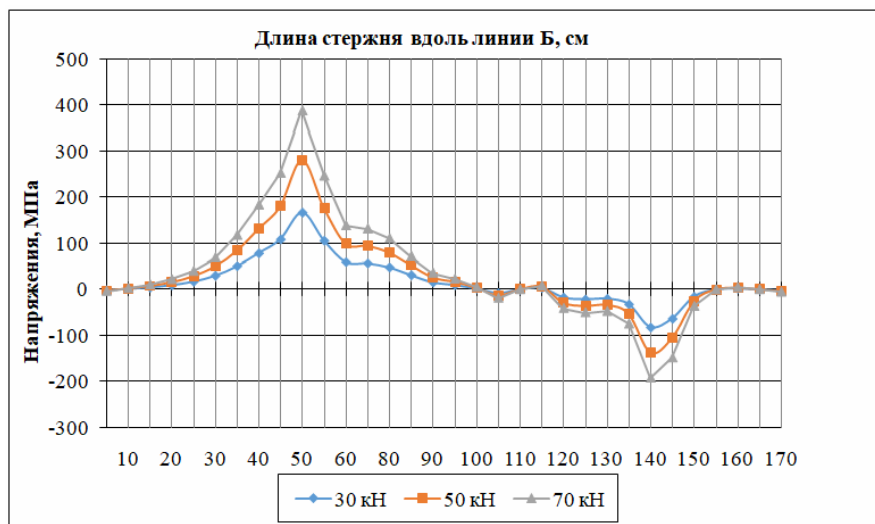


Рис. 9. Эпюра распределения напряжений в узле №2 вдоль линии Б
Fig. 9. Stress distribution diagram in node No2 along line B

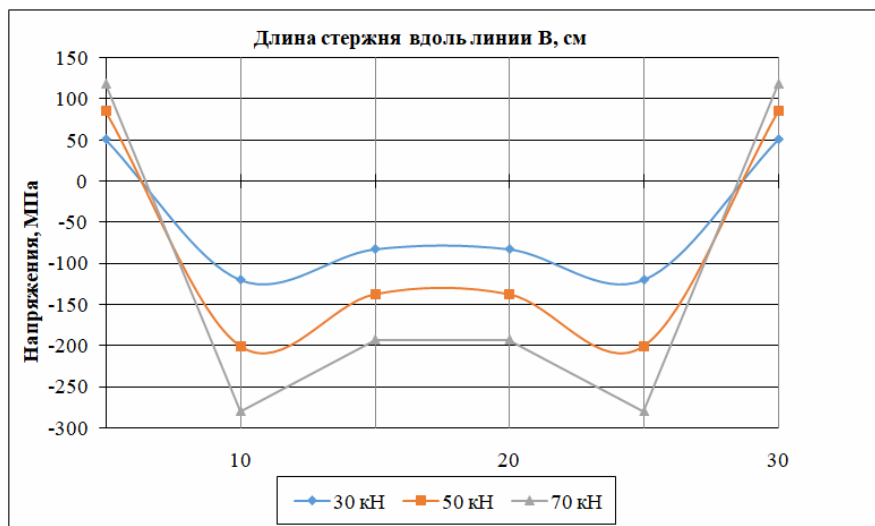


Рис. 10. Эпюра распределения напряжений в узле №2 вдоль линии Б
Fig. 10. Stress distribution diagram in node No2 along line B

Таблица 1. Сводная таблица расположения пиков продольных нормальных напряжений в узлах
Table 1. Summary table of the location of the peaks of longitudinal normal stresses in the nodes

№ Узла	Место расположения пика напряжений	Локализация пика напряжений по периметру сечения элемента узла	Локализация пика напряжений вдоль по пластинке	Примечание
Узел №1	На уровне верха и низа ригеля	На двух соседних пластинках	28-37 см от ригеля (общая длина 82-100 см)	
Узел №2	У верхнего края верхнего подкоса и у нижнего края нижнего подкоса	На двух соседних пластинках	20-25 см от краев подкосов (общая длина 120-130 см)	

ВЫВОДЫ

T-образные узлы с двумя подкосами имеют существенно меньшие деформации, а после снятия нагрузки ригели в значительной степени возвращаются к исходному положению. Это свидетельствует о большей жесткости T-образных узлов с подкосами по сравнению с узлами без подкосов. Жесткость T-образных узлов с подкосами в 4-5 раз выше, чем у узлов без подкосов.

При сравнении T-образных узлов с подкосами и без них видно, что в узлах с подкосами нарастание величины зоны пластичности происходит медленнее, чем в узлах без подкосов. Объясняется это распределением нагрузки на большую площадь пластинки стойки узла с подкосами.

Рассмотрение характера разрушения рамных узлов дает возможность сделать следующие выводы:

1) Разрушение узлов происходило или из-за образования трещин, или из-за потери местной устойчивости пластинками узлов. Разрушение всех узлов происходило после образование пластических зон, т.е. в упругопластической стадии работы узла.

2) В узлах №1, 2 образовались трещины в местах наибольшей концентрации растягивающих напряжений. В T-образных узлах трещины образовались после того, как пластинка стойки получила большие пластические деформации.

Исследования узлов позволили оценить эффективность усиления узлов различными конструктивными элементами или их сочетаниями.

С точки зрения теоретических методов расчета можно оценить для каждого типа конструктивного решения стыка, какие силовые факторы изменяются при каждом усилении узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ажермачев Г.А., Перминов Д.А. Конструктивное решение рамного узла, обеспечивающее снижение влияния концентраторов напряжений // Motrol. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. Symferopol-Lublin : 2009. Tom 11A. С. 94–100.
2. Ажермачев Г.А., Остриков Г.М. Экспериментальное исследование узловых соединений рамных каркасов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1972. № 9. С. 2–6.
3. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. К.: Факт, 2005. 344 с.
4. Лира 9.4. Примеры расчета и проектирования: Учебное пособие / Боговис В.Е., Гензерский Ю.В., Гераймович Ю.Д., Куценко А.Н. Киев: Факт, 2008. 280 с.
5. Лихтарников Я.М. Исследование узлов рамного типа из гнутых профилей // Промышленное строительство. 1971. № 10. С. 32–34.
6. FEMA-352. Recommended Postearthquake Evaluation and Repair Criteria for Welded Steel Moment-Frame Buildings / Federal Emergency Management Agency, SAC Joint Venture. June 2000.

7. Choi Jaehyung, S. C. Goel, B. Stojadinovic. Development of Free Flange Moment Connection // Technical Report UMCEE 00-15, Dep. of Civil and Environmental Eng. The University of Michigan, 2000.

8. Молев И.В., Святошенко А.Е. Создание расчетной модели рамного узла и обоснование принятых упрощений // Технические науки : сб. тр. аспирантов и магистрантов. Н. Новгород, 2005. С. 40–43.

9. Гузенков В.Н., Журбенко П.А. Компьютерное моделирование как основа геометрической подготовки в техническом университете // Строительство и техногенная безопасность. Симферополь, 2016. Вып. 4. С.64–65.

10. Металлические конструкции. В 3 т. Т.3. Стальные сооружения / ред. В.В. Кузнецов. М.: изд. АСВ, 1999. 528 с.

11. Килимник Л.Ш., Лаврентьева Л.Э. Работа узлов стальных каркасов зданий при статических и циклических нагрузках // Промышленное строительство. 1970. № 9. С. 28–32.

12. Перминов Д.А. Исследование напряженного состояния узлов из гнутых профилей замкнутого сечения // Строительство и техногенная безопасность. Симферополь, 2017. Вып. 7. С.47–54.

REFERENCES

1. Agermachev G.A., Perminov D.A. Structural solution of the frame node, providing a reduction in the influence of stress concentrators // Motrol. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. Symferopol-Lublin : 2009. Tom 11A. pp. 94–100.
2. Agermachev G.A., Ostrikov G.M. Experimental study of nodal joints of frame frames // News universities. Construction and architecture. 1972. No 9. pp. 2–6.
3. Gorodetsky A.S., Evzerov I.D. Komputerne modeli konstrukcij [Computer models of structures]. K.: Fakt, 2005. 344 p.
4. LIRA 9.4. Primery rascheta i proektirovania: Uchebnoe posobie [Examples of calculation and design: Tutorial] / Bogovis V.E., Genzerskiy U.V., Geraimovich U.D., Kucenko A.N. Kiev: Fakt, 2008. 280 p.
5. Lihtarnikov I.M. Investigation of frame-type units from bent profiles // Industrial engineering. 1971. No 10. pp. 32–34.
6. FEMA-352. Recommended Postearthquake Evaluation and Repair Criteria for Welded Steel Moment-Frame Buildings / Federal Emergency Management Agency, SAC Joint Venture. – June 2000.
7. Choi Jaehyung, S. C. Goel, B. Stojadinovic. Development of Free Flange Moment Connection // Technical Report UMCEE 00-15, Dep. of Civil and Environmental Eng. The University of Michigan, 2000.
8. Molev I.V., Sviatoshenko I.V. Creation of a calculation model of a frame node and justification of the accepted simplifications // Technical sciences: a collection of works of graduate students and undergraduates. N. Novgogrod, 2005. pp. 40–43.
9. Guzenkov V.N., Gurbenko P.A. Computer modeling as the basis of geometric-graphic training at a

technical university // **Construction and industrial safety**. Simferopol, 2016. Vol. 4. pp.64–65.

10. Metalicheskie konstrukcii [Metal structures]. In 3 volumes. Vol. 3. Steel structures / ed. V.V. Kuznetsov. M.: ed. ASV, 1999. 528 p.

11. Kilimnik L.S., Lavrentieva L.E. Operation of steel frame node of buildings under static and cyclic loads // *Industrial engineering*. 1970. No 9. pp. 28–32.

12. Perminov D.A. Investigation of the stress state of nodes from bent profiles of a closed section // **Construction and industrial safety**. Simferopol, 2017. Vol. 7. pp.47–54.

RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE OF NODES OF HEXAGONAL SECTION

Perminov D.A.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Institute "Academy of Construction and Architecture"
295493, Republic of Crimea, Simferopol, Kievskaya street, 181,
E-mail: dmitriy714@mail.ru;

Abstract: The article presents elements made from bent profiles of hexagonal cross-section. An analysis of the stress distribution in the node elements for two-design solutions was performed. The nature of the destruction of nodes is considered.

Subject: T-shaped nodes, in which the cross-section of the crossbar was significantly smaller than the cross-section of the rack. Two types of nodes were considered. The first type: with the crossbar attached to a through (without cutout) rack through a special plate. Second type: with a direct connection of the crossbar to the through post and reinforcement of the unit with two struts.

Materials and methods: The calculation of the stress-strain state of the models of the frame nodes was performed using the LIRA-CAD software package, the theoretical basis of which is the finite element method, implemented in the form of displacements.

Results: Based on the results of the calculation in the elastic stage, data were obtained on the distribution of longitudinal stresses in the most stressed sections of the assembly elements.

Conclusions: The results of the study of frame nodes showed that the destruction of the nodes occurred either due to the formation of cracks, or due to the loss of local stability by the plates of the nodes. The destruction of all nodes occurred after the formation of plastic zones, i.e. in the elastoplastic stage of the node operation. Also, the studies of nodes made it possible to evaluate the effectiveness of strengthening the nodes with various structural elements or their combinations.

Key words: frame nodes, closed bent profile with hexagonal section, stresses.