



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

N3, ТОМ 15 (2009) 161-176

УДК 692.44/47

(09)-0194-1

## **ПРО МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ШАРНІРНОЇ МОДЕЛІ ЗВАРЕНОГО ВУЗЛА СПОЛУЧЕННЯ БАЛКИ З КОЛОНОЮ, ВИКОНАНОГО ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ДВОХ ВЕРТИКАЛЬНИХ ШВІВ**

**В.Ю. Алпатов, І.С. Холопов**

*Самарський державний архітектурно-будівельний університет,*

*вул. Молодогвардійська 194, 443001, м. Самара, Росія.*

*E-mail: vadim@mail.ru*

*Отримана 8 липня 2009; прийнята 28 вересня 2009*

**Анотація.** У статті подано оглядовий аналіз відомих вирішень вузлового з'єднання двотаврової балки з колоною. Розглянуті відомі вузли серійних і типових металевих конструкцій, що моделюють жорстку і шарнірну роботу з'єднання. Виділені основні ознаки віднесення вузла до шарнірного або жорсткого типу залежно від їх конструктивних особливостей. Представлена конструкція зварного вузла сполучення балки з колоною, відмінна від типових рішень. Для цього вузла виконані дослідження його напружено-деформованого стану. Проведений аналіз відповідності силової роботи вузла шарнірної розрахункової моделі. Представлені результати нелінійного машинного розрахунку вузла із застосуванням спеціалізованого розрахункового комплексу. Дані оцінки міцності елементам, що складають вузлове з'єднання при заданій їх геометрії і за заданих умов їх навантаження. За критерій вичерпання елементом вузла міцності прийнятий рівень еквівалентних напружень, що відповідають прояву текучості в матеріалі.

**Ключові слова:** типові розв'язки, серії, вузол сполучення, сталь, плинність, чисельні дослідження, нелінійний розрахунок, напруження, несуча здатність, Мізес.

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ШАРНИРНОЙ МОДЕЛИ СВАРНОГО УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ БАЛКИ С КОЛОННОЙ, ВЫПОЛНЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ДВУХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШВОВ**

**В.Ю. Алпатов, И.С. Холопов**

*Самарский государственный архитектурно-строительный университет,*

*ул. Малогвардейская 194, 443001, г. Самара, Россия.*

*E-mail: vadim@mail.ru*

*Получена 8 июля 2009; принята 28 сентября 2009*

**Аннотация.** В статье дан обзорный анализ известных решений узлового соединения двутавровой балки с колонной. Рассмотрены известные узлы серийных и типовых металлических конструкций, моделирующие жесткую и шарнирную работу соединения. Выделены основные признаки отнесения узла к шарнирному или жесткому типу в зависимости от их конструктивных особенностей. Представлена конструкция сварного узла сопряжения балки с колонной, отличная от типовых решений. Для этого узла выполнены исследования его напряженно-деформированного состояния. Проведен анализ соответствия силовой работы узла шарнирной расчетной модели. Представлены результаты нелинейного

машинного расчета узла с применением специализированного расчетного комплекса. Даны оценки прочности элементам, составляющим узловое соединение при заданной их геометрии и при заданных условиях их нагружения. За критерий исчерпания элементом узла прочности принят уровень эквивалентных напряжений, соответствующих проявлению текучести в материале.

**Ключевые слова:** типовые решения, серии, узел сопряжения, сталь, текучесть, численные исследования, нелинейный расчет, напряжения, несущая способность, Мизес.

## ABOUT APPLICATION OF MODEL OF THE HINGE FOR WELDED UNIT OF THE BEAM, EXECUTED BY TWO VERTICAL SEAMS

Vadim Yu. Alpatov, Igor S. Kholopov

*Samara State University of Architecture and Civil Engineering*

*Molodogvardeyskaya str., 194, 443001, Samara, Russia*

*E-mail: vadim@mail.ru*

*Received 8 July 2009; accepted 28 September 2009*

**Abstract.** There are analyzed certain solutions of a I-beam and column assembly connection. There are considered certain assemblies of commercial and standard metal structures simulating a rigid and hinged connection. The basic features of an assembly belonging to the hinged or rigid type of connection depending on their design features are sorted out. There is presented a structure of weld assembly of a beam and column connection which differs from standard solutions. For this assembly its mode of deformation was studied. Correspondence of the assembly force work to the hinged designed model was analyzed. There are given the results of a non-linear machine computation of the assembly with the use of a specialized computation complex. Strength of the elements comprising the assembly connection at their task geometry and desired conditions of their loading is estimated. The level of reduced stresses corresponding to the yielding flow phenomenon in a material is taken as a criterion of strength exhaustion by an assembly element.

**Keywords:** standard solutions, series, assembly conjunction, steel, yielding flow, numerical researches, nonlinear computation, stresses, carrying capacity, Mises.

Современный этап развития строительства характерен разнообразием индивидуальных проектов и отказом от типовых решений. Этой тенденции способствуют с одной стороны отмена большинства серий, а с другой стороны развитие специализированных и универсальных программных комплексов, позволяющих решать сложные инженерные задачи и попытки проектировщиков получить с их помощью решение более рациональное, нежели типовое.

Стремление эффективного использования стали в металлических каркасах зданий и сооружений приводит к необходимости поиска наиболее рациональных и простых в изготовлении и монтаже узловых соединений, в частности узлов крепления балок. Известны типовые решения шарнирных и рамных узлов сопряжения стальных балок с колоннами [1]-[4], [8]-[11]. Такие решения имеют значительные

преимущества перед вновь вводимыми - это их изученность и надежность работы, проверенная временем. Для стандартных (типовых) решений узлов выполнены многочисленные исследования их действительной работы и доказательно обоснована приемлемая расчетная модель. В частности, в типовых сериях указано отнесение каждого конкретного узла к шарнирному либо рамному.

Для узлов, отличающихся от типовых, имеется значительная доля неизвестности их действительной работы. Такие узлы зачастую являются либо результатом инженерной мысли, стремящейся упростить (оптимизировать) известное решение, либо, иногда, могут быть просто результатом ошибочного, неграмотного исполнения типового решения. При разработке новых узловых соединений изначально возникает необходимость оценки их надежности.

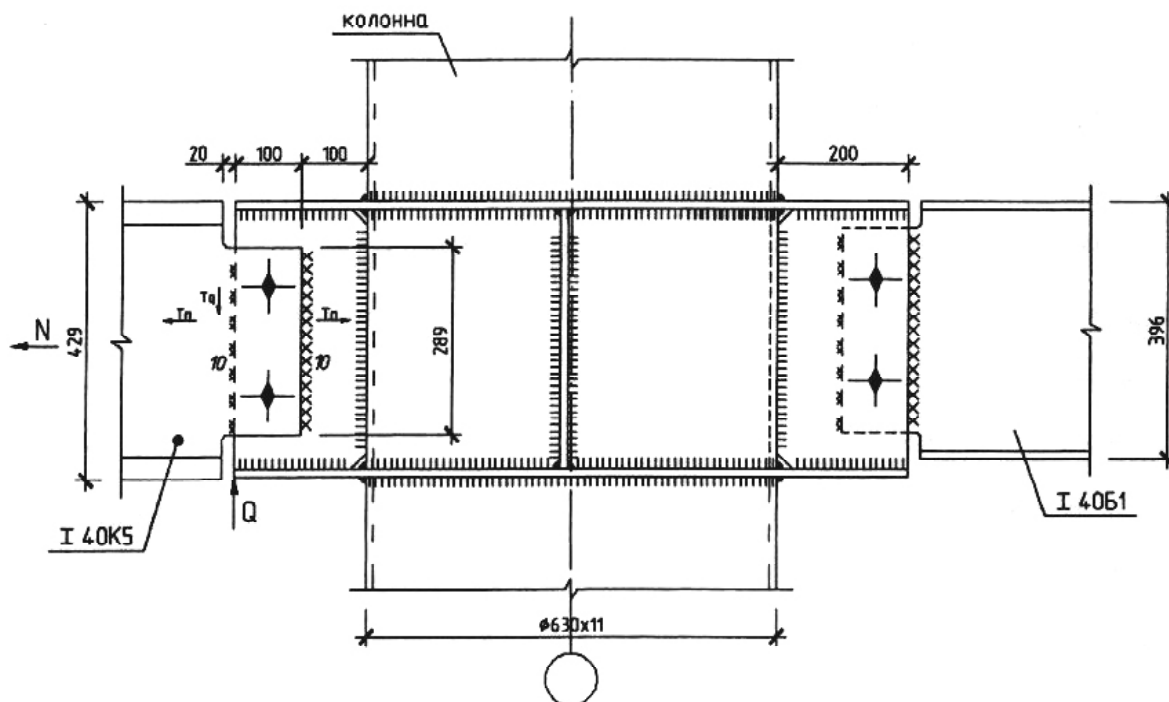


Рис. 1. Исследуемый узел сопряжения балки с колонной.

Решение задачи по определению надежности соединения приводит к потребности оценки жесткости узла и отнесения его к шарнирному или рамному. Иногда, оказывается, сложно сразу определить характер работы узлового соединения. В таких случаях требуется выполнение специальных исследований действительной работы узла.

Подобная проблема возникла для узла, изображенного на рисунке 1. Этот узел был применен при строительстве общественного здания с металлическим каркасом. К авторам обратились его проектировщики с просьбой оценить прочность узла сопряжения, сделать вывод о его несущей способности.

Визуальный анализ представленного узла и сравнение его с известными решениями не позволили однозначно определить характер его действительной работы. На рисунках 2-8 представлены известные аналоги исследуемого узла. Их анализ и анализ литературы [1]-[7], [14]-[17], позволяют сделать вывод о том, что узел работает как рамный, если он обладает значительной изгибной жесткостью. Изгибная жесткость узла зависит от его конструктивных осо-

бенностей. Как правило, к рамным узлам балок относят их соединения, имеющие жесткие сопряжения полков. Эти сопряжения конструктивно могут реализовываться в виде накладок на болтах (рис. 7) или сварке (рис.8), либо в виде фланцев (рис. 7). Узлы, имеющие разрывы в поясах у присоединяемой балки, в большинстве своем относятся к шарнирным (рис. 2-6). Отличием исследуемого узла от рассмотренных аналогов является наличие у сварного соединения стенки балки пары разнесенных вертикальных швов. Эта пара швов способна воспринимать изгибающий момент и придает определенную жесткость узлу даже при наличии разрывов в поясах балки. Такой узел обладает конечной жесткостью, но то же характерно и для узлов (рис. 2-6), отнесенных к шарнирным. Для уточнения величины влияния жесткости такого соединения на напряженно-деформированное состояние (НДС) узла были выполнены его численные исследования. Численные исследования указанного узла выполнены методом конечных элементов (МКЭ) с применением расчетного комплекса CosmosWorks.

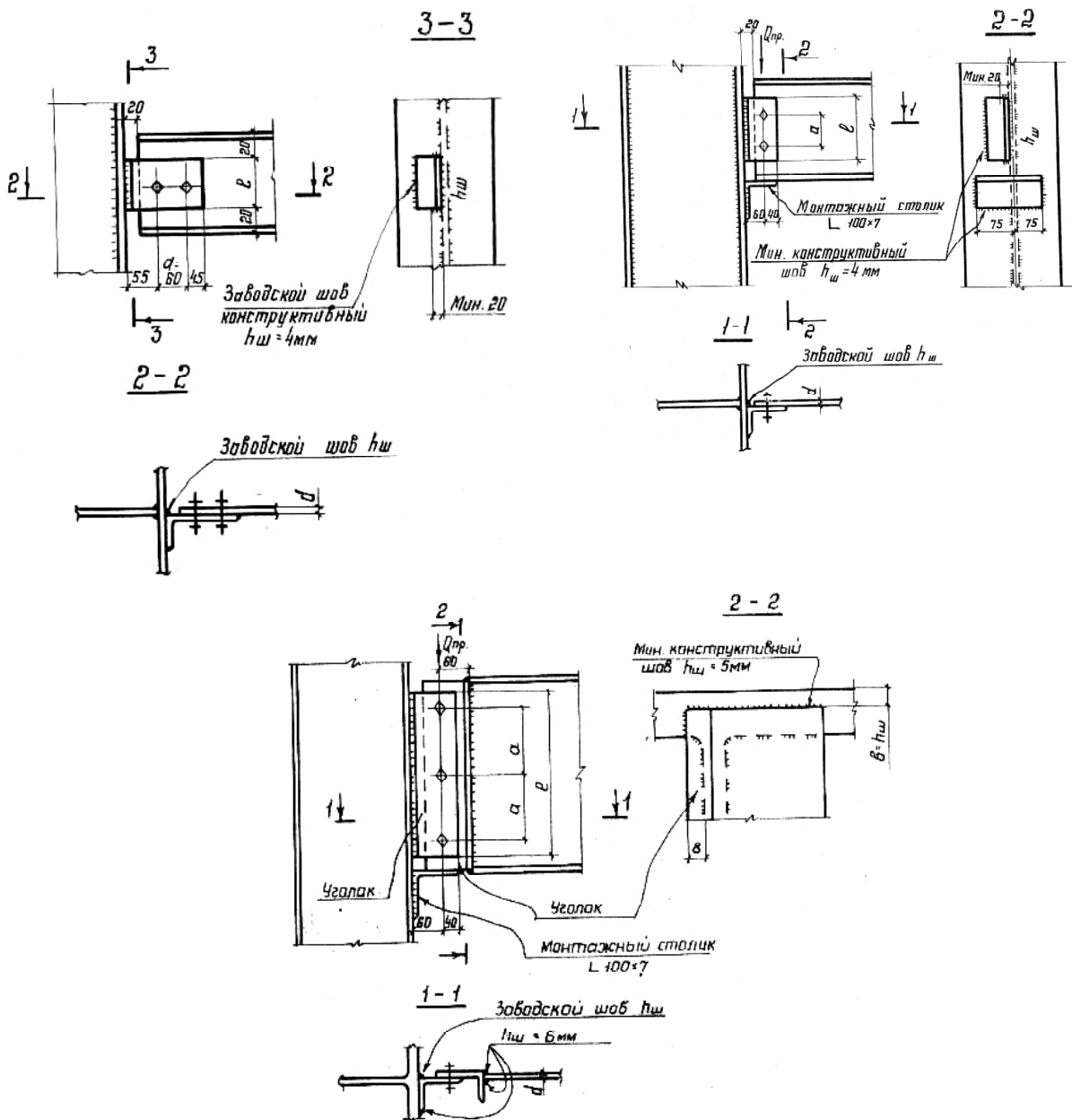


Рис. 2. Шарнирные узлы на болтах по серии 2.440-1.1.

Геометрическая модель балки с участками колонн в местах ее примыкания (далее по тексту Модель) создана в программном комплексе SolidWorks как сборка, состоящая из твердотельных деталей - балка, два участка колонн, четыре сварных шва. Сопряжение балки с колоннами выполняется через посредство сварных швов.

Расчетная модель сформирована на основе твердотельных тетрагональных четырех узловых конечных элементов (КЭ). Граничные условия приняты таким образом, чтобы имитировать работу расчетного участка в составе общего каркаса здания, то есть моделируют поведение "отброшенной" части каркаса на работу принятой расчетной схемы. Задача решается как

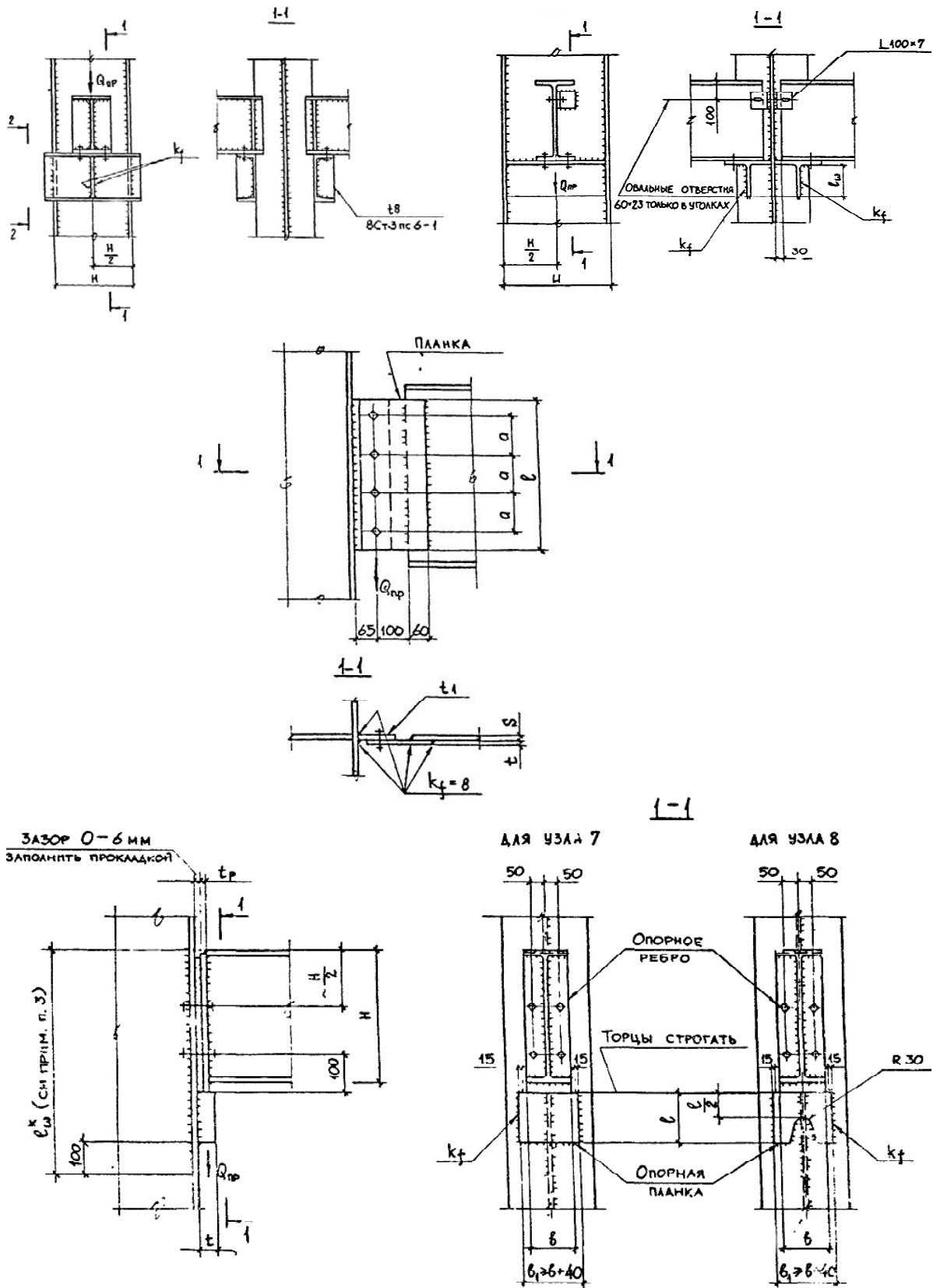


Рис. 3. Шарнирные узлы на болтах по серии 2.440-2.1.

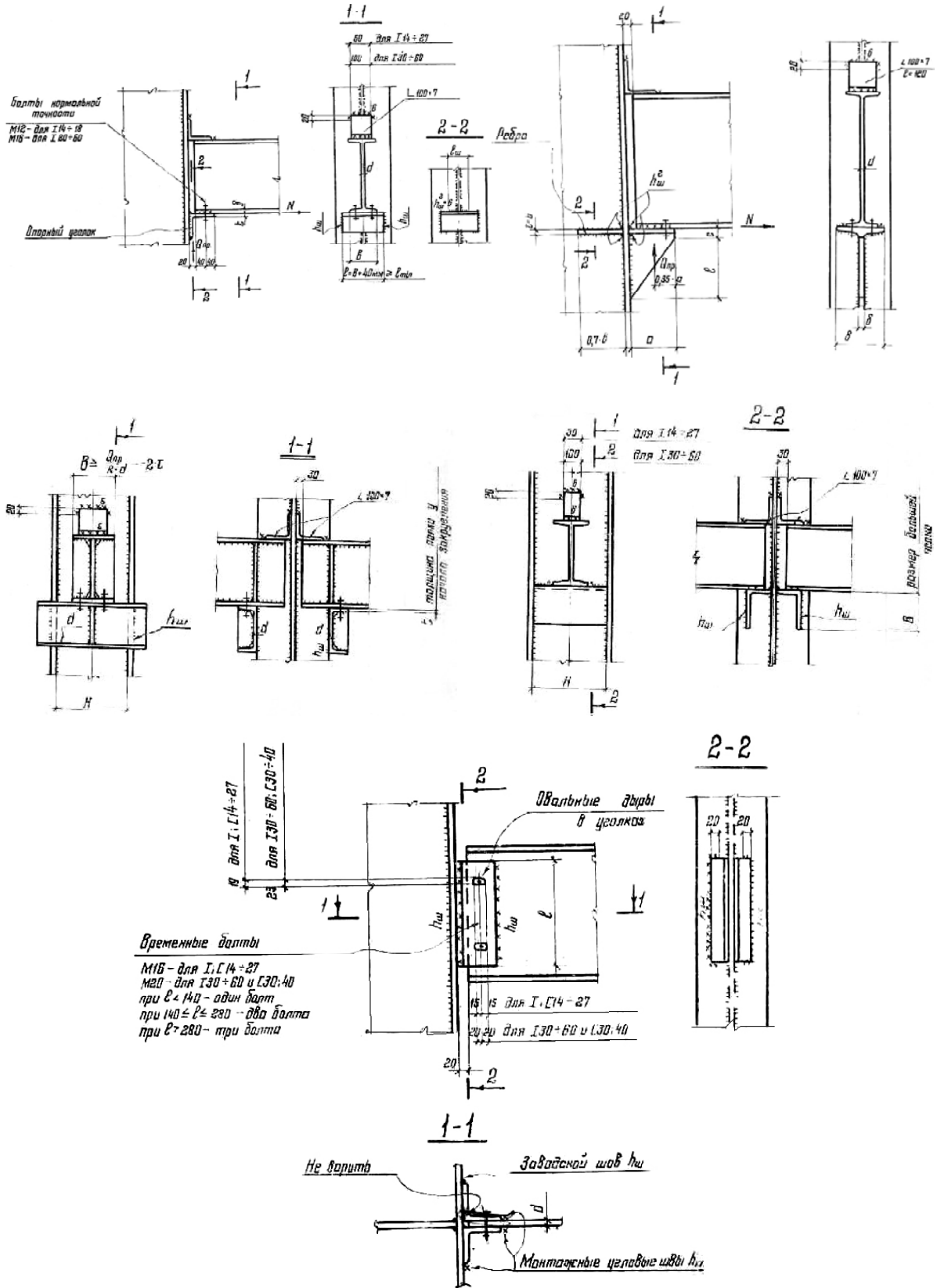


Рис. 4. Шарнирные узлы на сварке по серии 1.400-10/76.

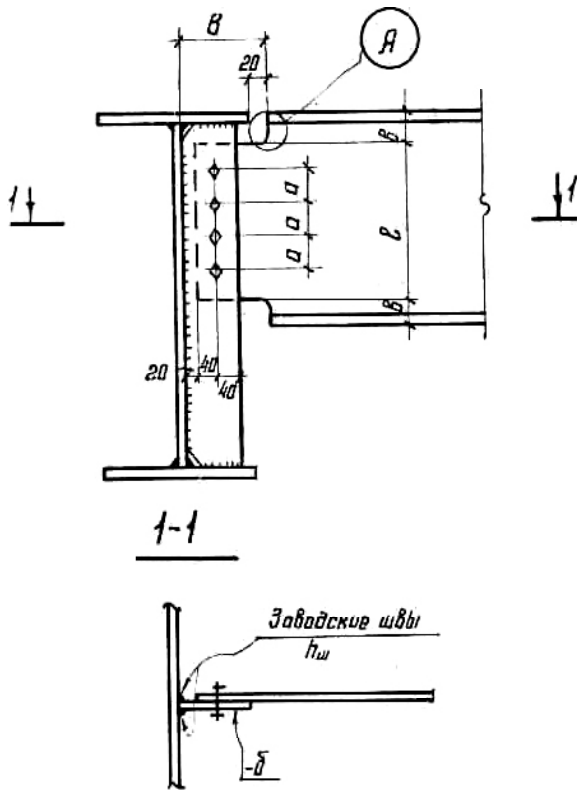


Рис. 5. Шарнирный узел на болтах по серии 1.400-10/76.

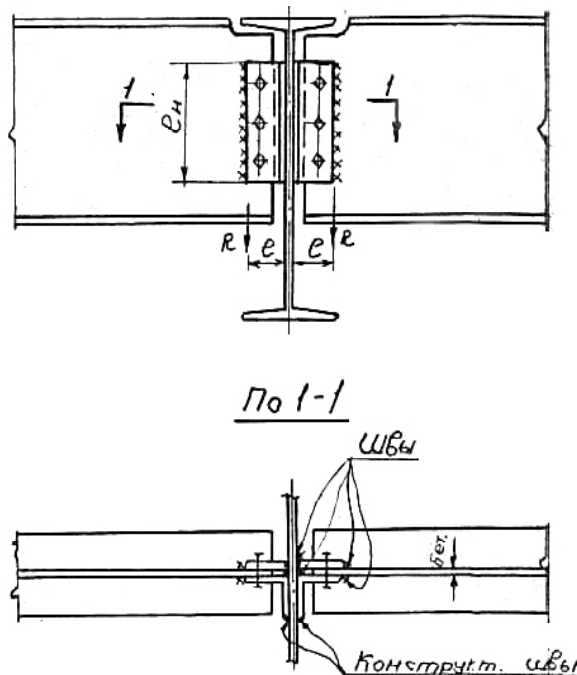


Рис. 6. Шарнирный узел на сварке по серии 1926/66.

физически нелинейная. Для описания физической нелинейности материала принята диаграмма упруго-пластической работы стали С245 (Ст3), представленная на рисунках 10, 11. Она принята на основании линейаризации участков нелинейной работы материала по диаграмме растяжения Ст3, представленной в справочном пособии [7] и на рисунке 11.

Выполнены численные исследования НДС расчетной модели на нагрузки соответствующие проектным. Расчеты выполнены в упруго-пластической нелинейной постановке.

В результате машинного расчета построены эпюры напряжений, перемещений и деформаций Модели, определены величины напряжений и характер их распределения. Нагрузка на Модель прикладывалась шагами. Величина шага определялась ЭВМ автоматически. Всего было выполнено 25 шагов итераций. На шаге №8 были достигнуты напряжения, соответствующие концу упругой работы материала и началу его упруго-пластической деформации. Шаг №25 – упруго-пластическая работа материала (конец расчета, соответствующий приложению полного значения нагрузки). Далее представлены результаты расчета для Шага №25.

Результаты расчетов Модели кратко представлены в графическом виде на рисунках 13-20. Из рисунков видно, что:

- деформация балки имеет вид, характерный для шарнирного закрепления ригеля;
- все составляющие элементы узла находятся в основном в стадии упругой работы;
- напряжений текучести достигают лишь небольшие участки листовой фасонки и сварных швов. На отмеченных участках развиваются ограниченные пластические деформации, величина которых не выходит за пределы упруго-пластической работы стали;
- участки с напряжениями, превышающими расчетное сопротивление стали, составляют не более 5% длины элементов;
- основную долю нагрузки воспринимает шов, наиболее удаленный от конца балки. Из пары швов, прикрепляющих балку к листовой фасонке колонны, он является наиболее напряженным.

Исследования позволили заключить, что представленный узел обладает конечной жесткостью,

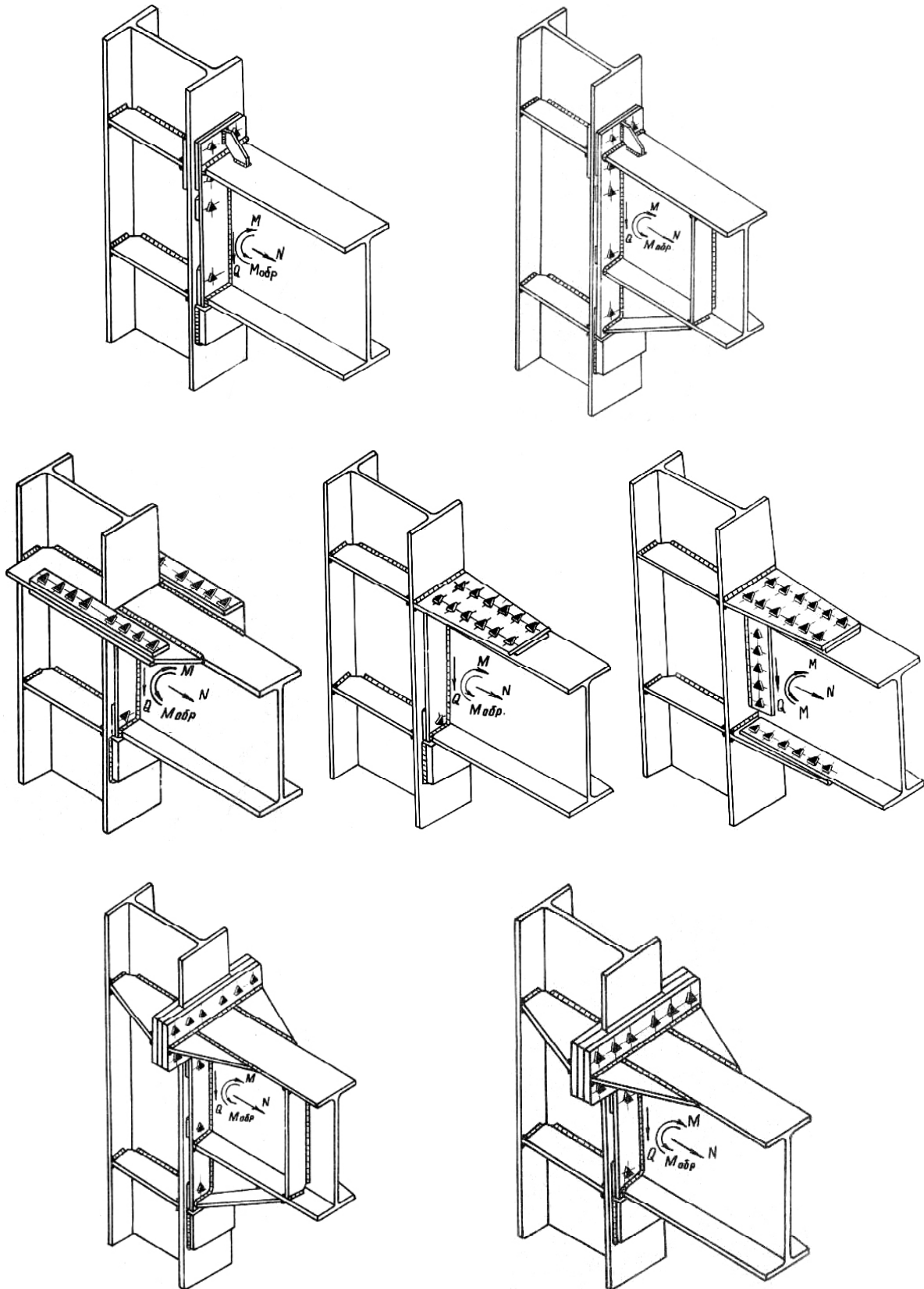


Рис. 7. Рамные узлы на фланцах по сериям 2.440-1.1, 2.440-2.1.



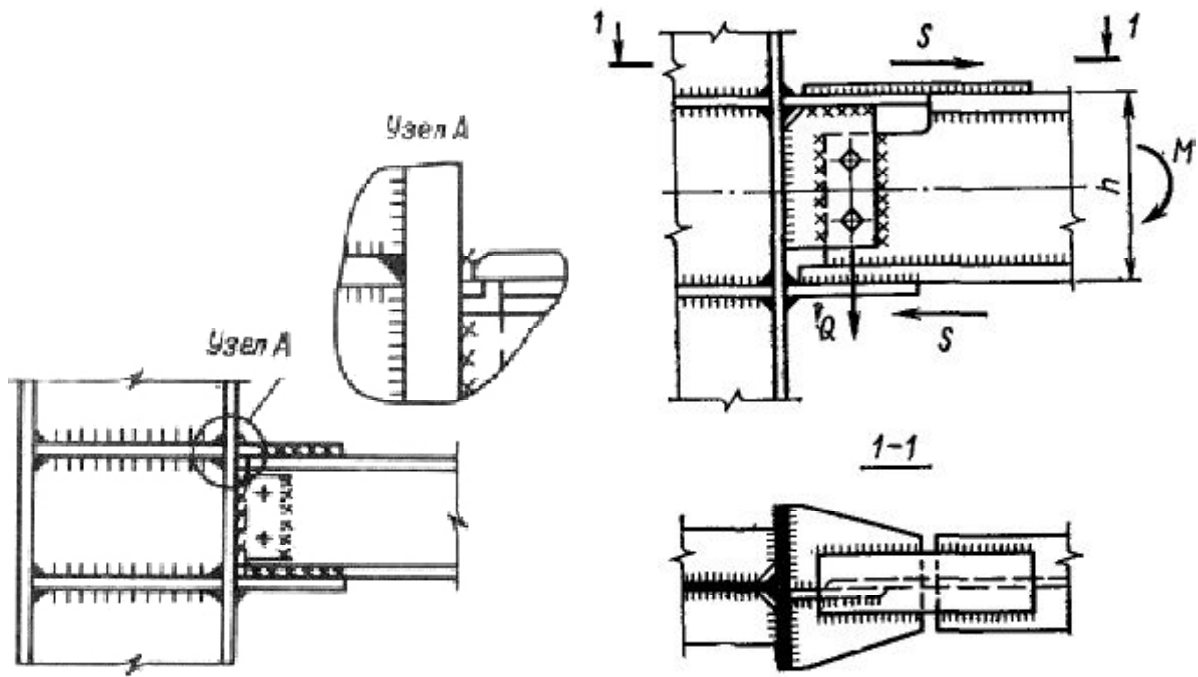


Рис. 8. Рамные узлы на сварке по [15], [16].

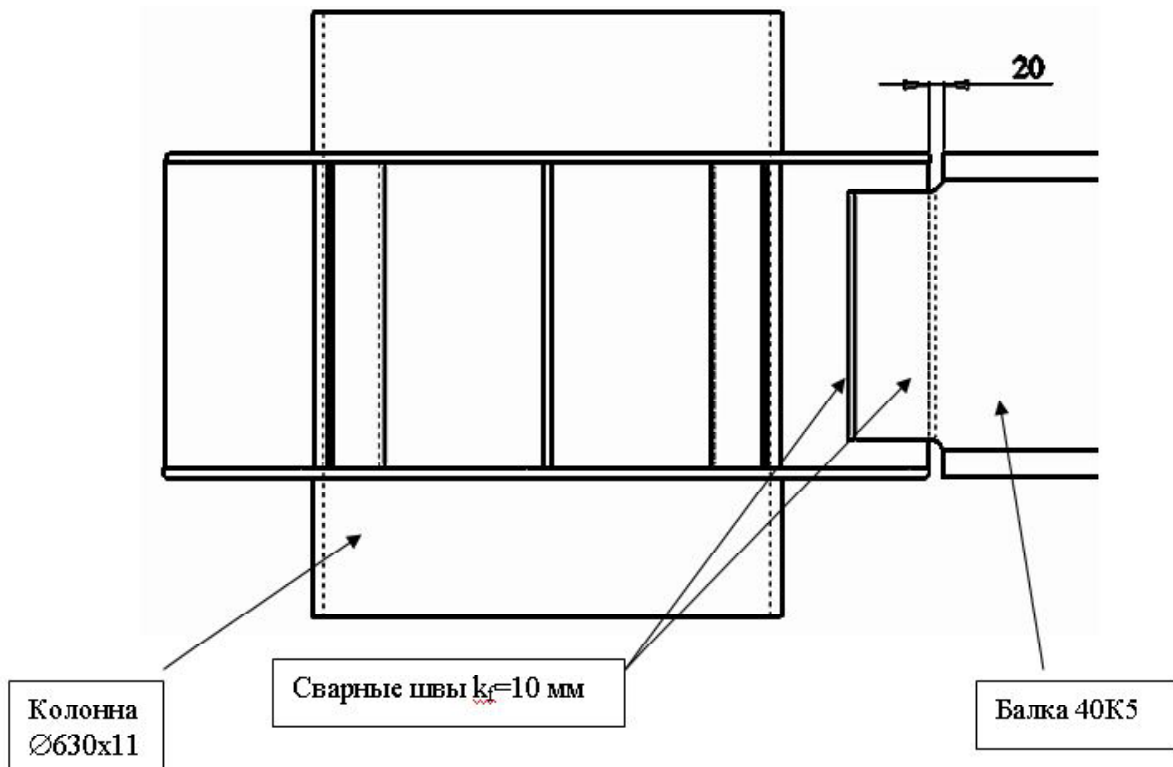


Рис. 9. Геометрическая модель балки с участками колонн в местах ее примыкания.

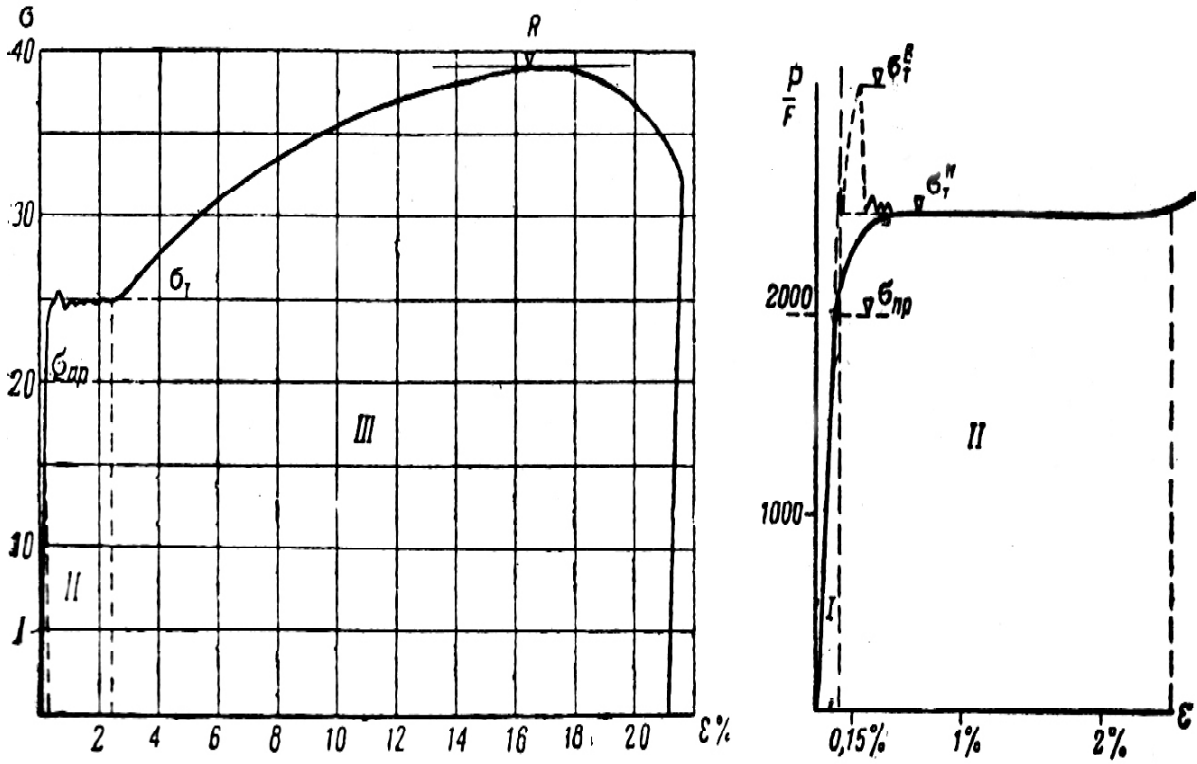


Рис. 10. а) Диаграмма растяжения Ст3; б) Деформация растяжения в упруго-пластической области. Зуб текучести.

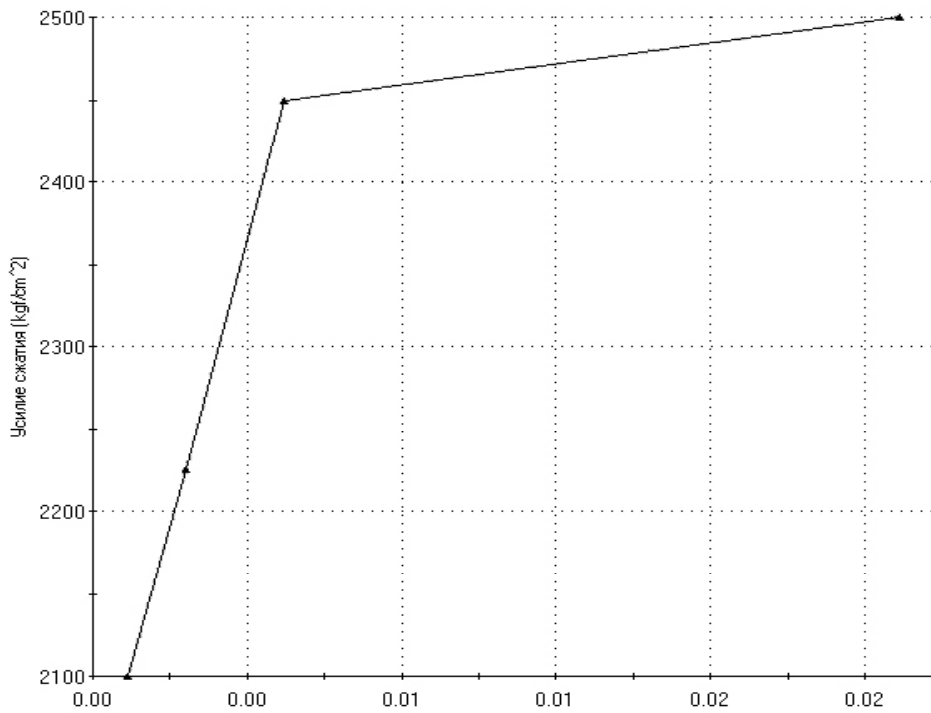


Рис. 11. Линеаризованный участок упруго-пластической работы расчетной диаграммы стали S245.

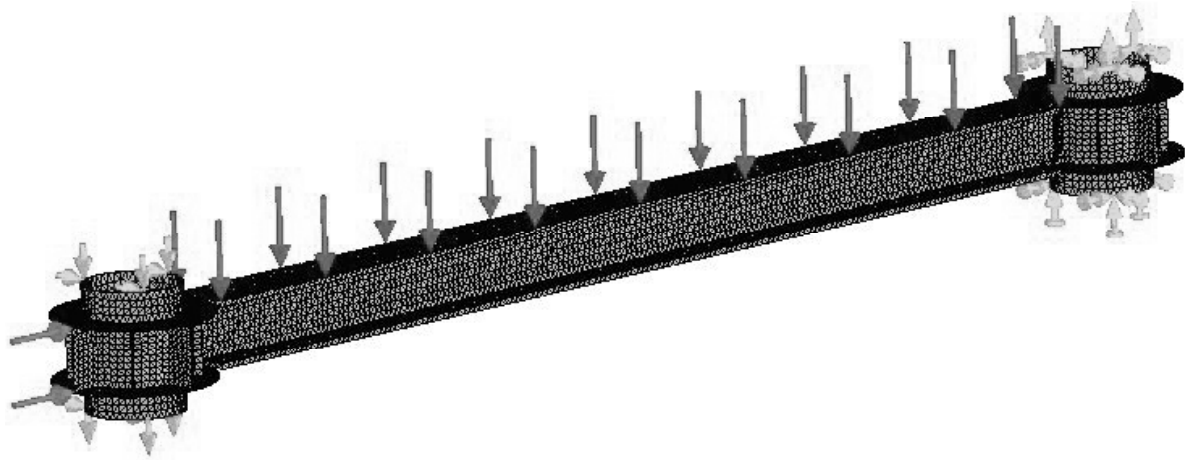


Рис. 12. Расчетная модель Балки в программном комплексе CosmosWorks.

Имя модели: Н\_4  
 Имя упражнения: нелинейный\_полезная 400  
 Тип эпюры: Суммарное напряжение Построение1  
 Шаг эпюры: 25 время: 1 Секунды  
 Шкала деформации: 85.0933



Рис. 13. Напряжения по Мизесу. Шаг итерации 25, соответствующий полному загрузению балки и упруго-пластической работе материала.

Имя модели: Н\_4  
 Имя упражнения: нелинейный\_полезная 400  
 Тип эпюры: Суммарное напряжение Построение1  
 Шаг эпюры: 25 время: 1 Секунды  
 Шкала деформации: 85.0933

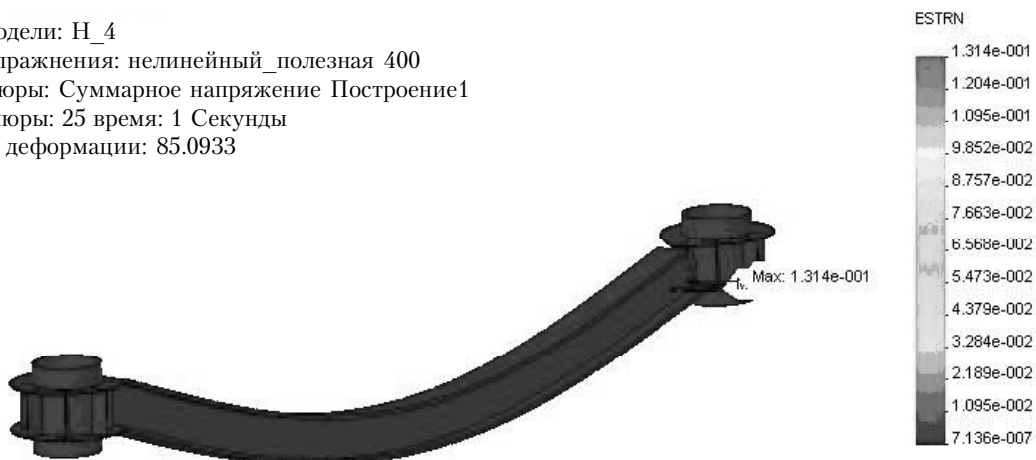


Рис. 14. Относительная деформация модели, %. Шаг итерации 25.

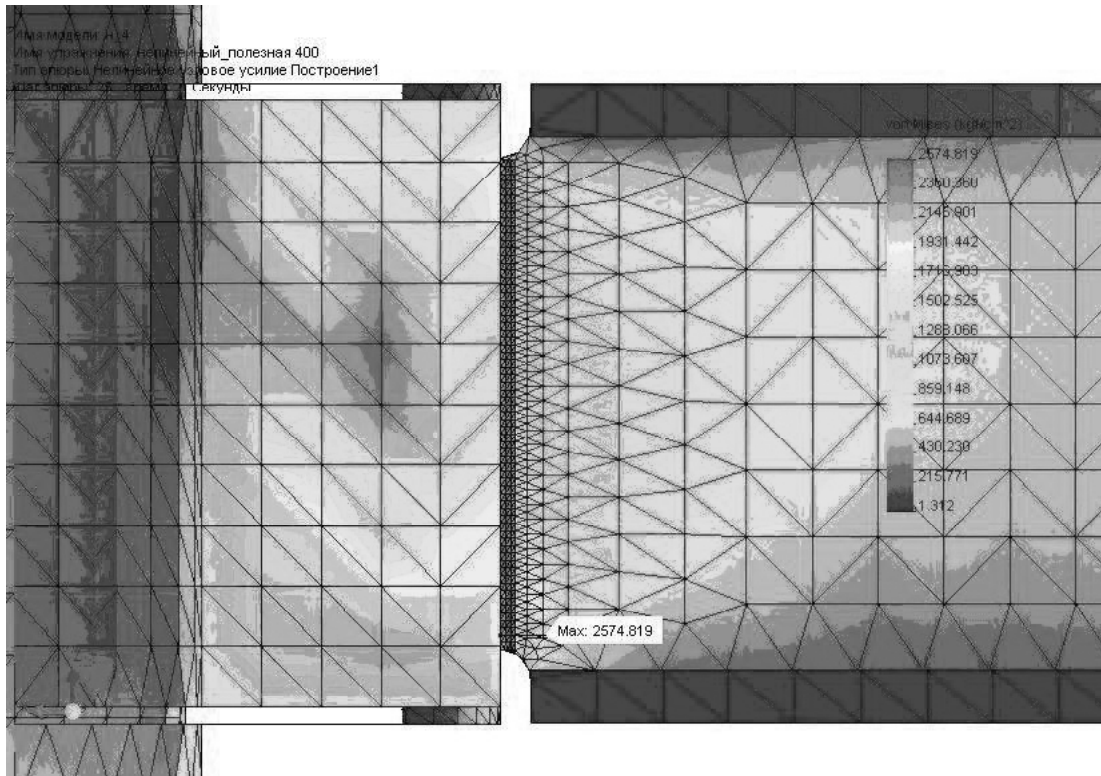


Рис. 15. Напряжения по Мизесу. Шаг итерации 25.

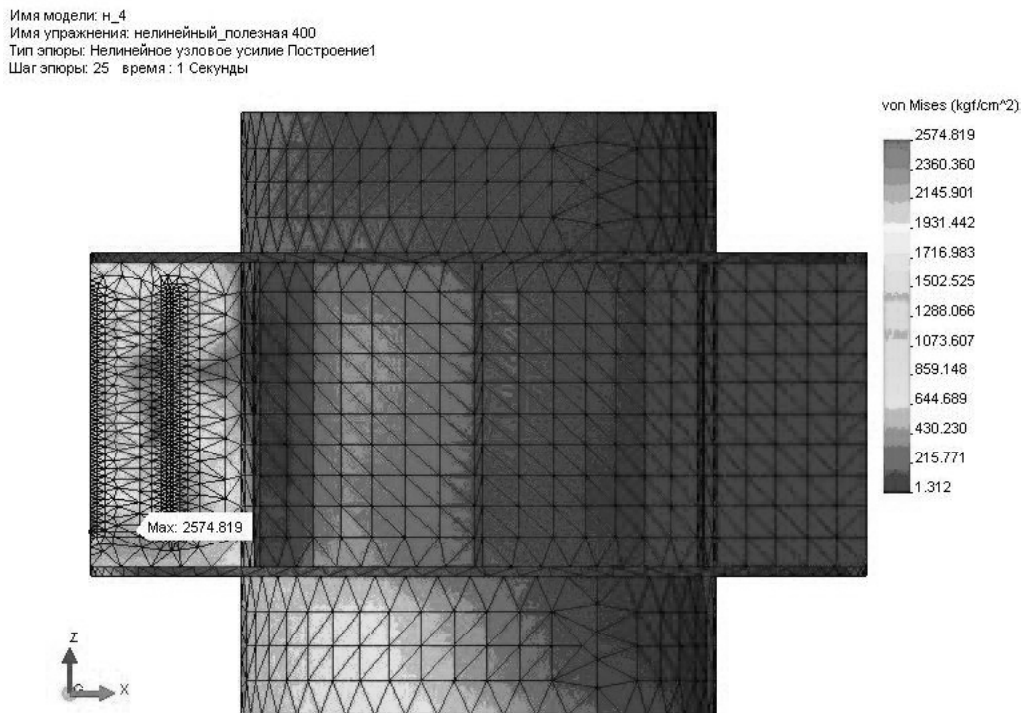


Рис. 16. Напряжения в листовой фасонке колонны. Шаг итерации 25.

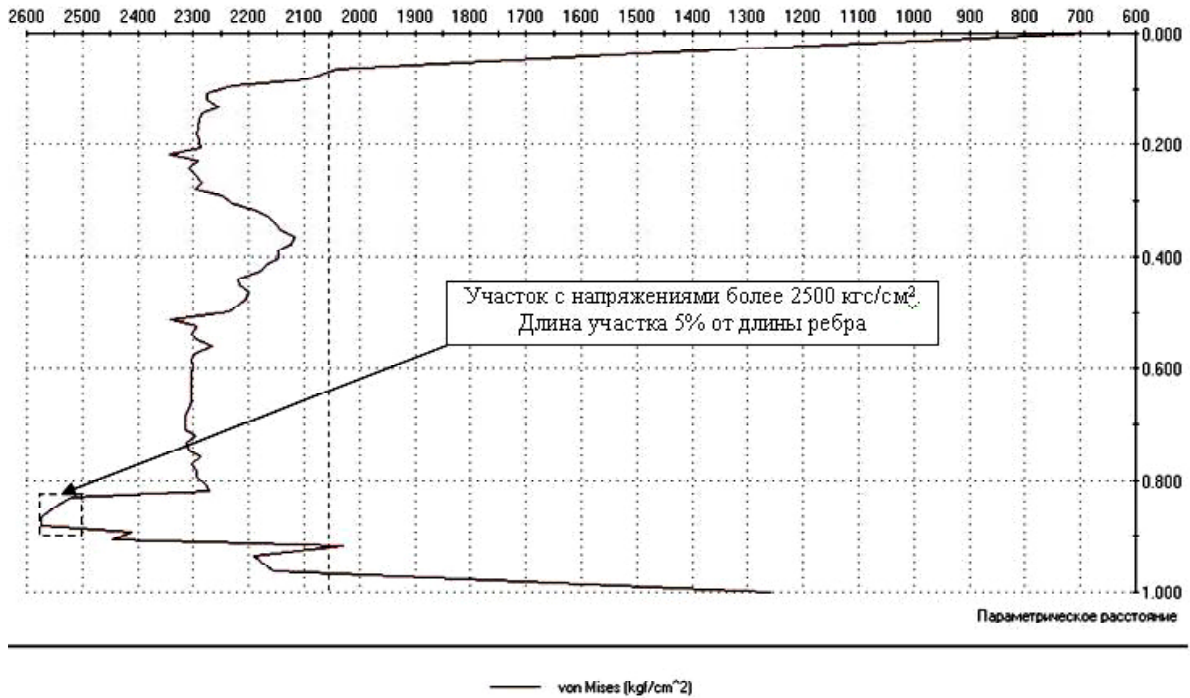


Рис. 17. Эпюра напряжений по кромке листовая фасонки колонны. Шаг итерации 25.

Имя модели: н\_4  
Имя упражнения: нелинейный\_полезная 400  
Тип эпюры: Нелинейное узловое усилие Построение1  
Шаг эпюры: 25 время: 1 Секунды

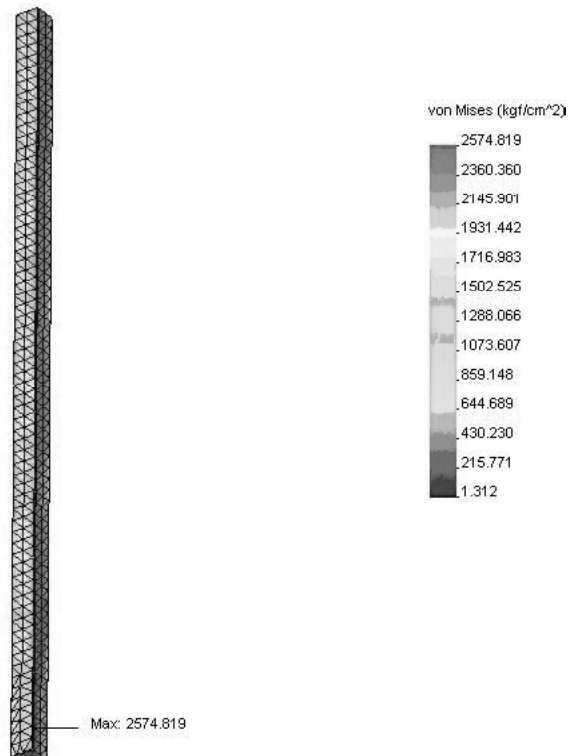
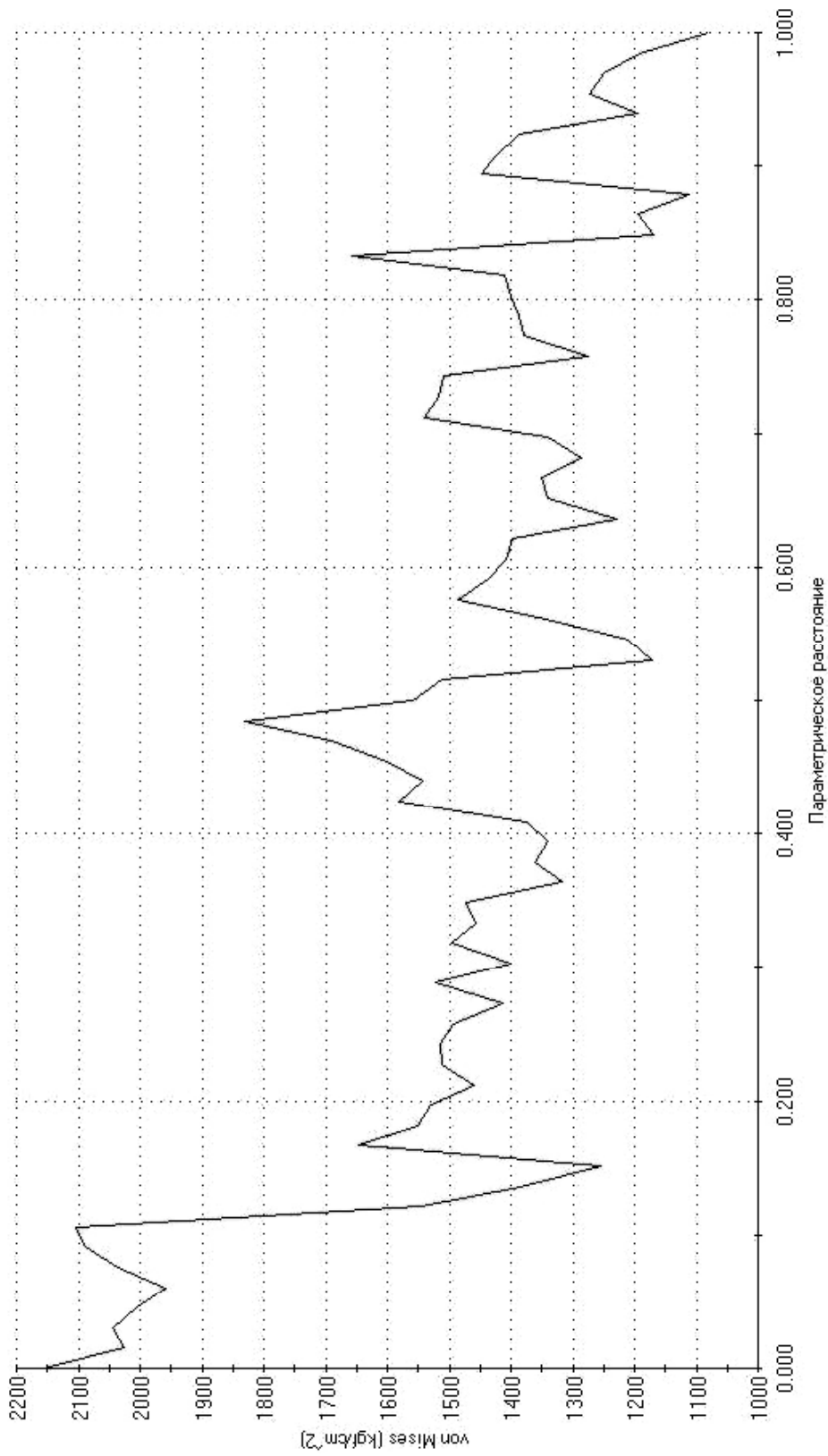
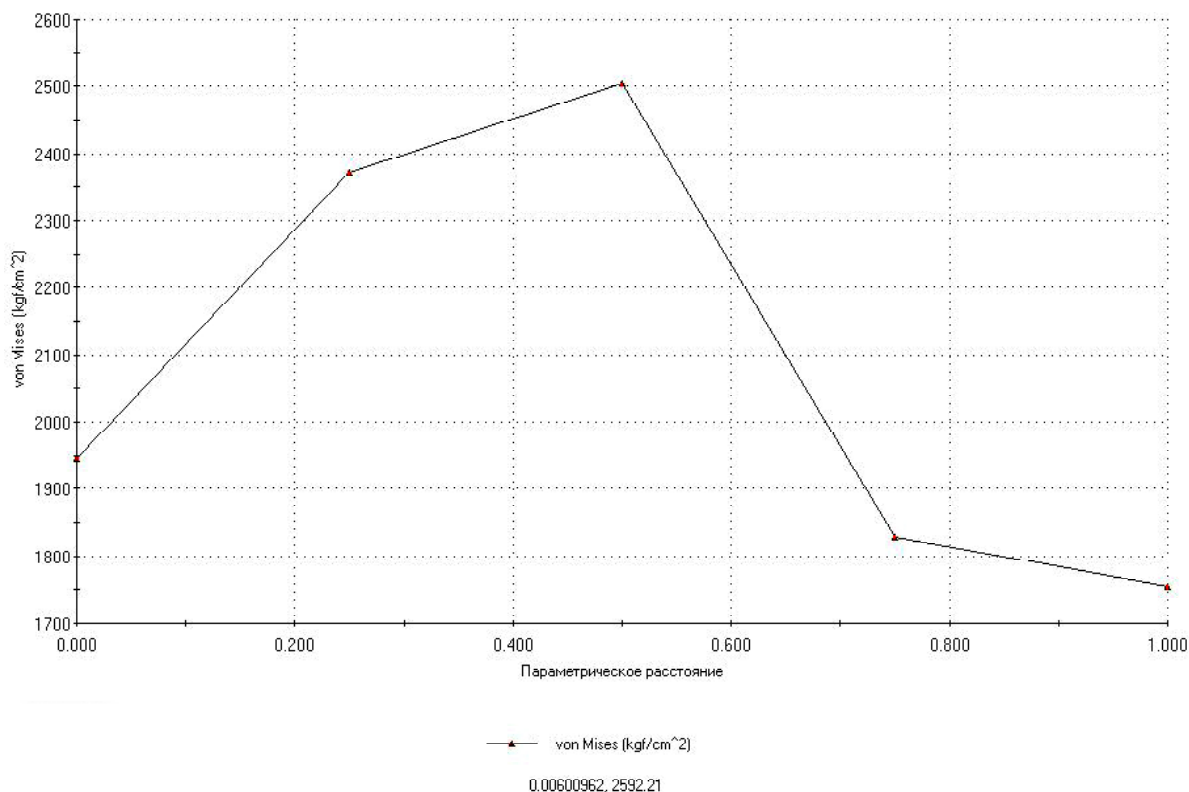


Рис. 18. Максимально напряженный сварной шов крепления балки к колонне. Напряжения по Мизесу. Шаг итерации 25.



**Рис. 19.** Эпюра напряжений по Мизесу для продольной кромки максимально напряженного сварного шва крепления балки к колонне. Шаг итерации 25.



**Рис. 20.** Эпюра напряжений по Мизесу для поперечной кромки максимально напряженного сварного шва крепления балки к колонне. Шаг итерации 25.

но в практических расчетах ею можно пренебречь и рассматривать его как шарнирный. Исследования позволили дать ответ на главный вопрос, поставленный перед авторами - несущая способность узла достаточна для восприятия расчетных нагрузок и его прочность обеспечена. Этот вывод сделан для заданных проектных условий и носит частный характер. Для более общих выводов и, возможно, разработки рекомендаций по применению представленного узла требуется выполнить дополнительные более глубокие исследования, в том числе и натурные испытания.

### Литература

1. Беленя Е.И. Металлические конструкции. Общий курс. — М.: Стройиздат, 1985.
2. Ведерников Г.С. Металлические конструкции. Общий курс: Учеб. для вузов/ Г.С. Ведерников, Е.И. Беленя, В.С. Игнатъева и др.; Под ред. Г.С. Ведерникова — М.: Стройиздат, 1998.
3. Горев В.В. Металлические конструкции. В 3 т. Учеб. для строит. вузов/ В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов и др.; Под ред. В.В. Горева. — М.: Высш. шк., 2002, 2004.
4. Кузнецов В.В. Металлические конструкции. В 3 т. Стальные конструкции зданий и сооружений. (Справочник проектировщика); Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В.Кузнецова (ЦНИИ проектстальконструкция им. Н.П.Мельникова) — М.: Изд-во АСВ, 1998.
5. Пособие к СНиП II-23-81 "Пособие по расчету и конструированию сварных соединений стальных конструкций" /ЦНИИСК им. Кучеренко. — М: Стройиздат, 1984.
6. Пособие к СНиП II-23-81\* "Пособие по проектированию стальных конструкций" /ЦНИИСК им. Кучеренко. —М: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.
7. Расчетно-теоретический справочник проектировщика. /под ред. И.С. Бородина. — М.: Стройиздат, 1961, — 1040с.
8. Серия 1.-400-10/76. Типовые узлы стальных конструкций одноэтажных производственных зданий. Выпуск 7. Узлы разрезных балок.
9. Серия 2.440-1.1. Узлы стальных конструкций производственных зданий. Выпуск 1. Рамные и

- шарнирные узлы балочных клеток и примыкания ригелей к колоннам.
10. Серия 2.440-2. Узлы стальных конструкций производственных зданий промышленных предприятий. Выпуск 1. Рамные и шарнирные узлы балочных клеток и примыкания ригелей к колоннам.
  11. Серия. Выпуск 1926/66. Типовые детали и конструкции зданий и сооружений. Унифицированные узлы стальных конструкций из прокатных и составных профилей. Альбом VI. Узлы балочных клеток.
  12. СНиП II-23-81\* "Стальные конструкции" / Госстрой СССР. –М: ЦИТП Госстроя СССР, 1990.
  13. СТО 02494680-0049-2005. Конструкции стальные строительные. Основные принципы расчёта на прочность, устойчивость, усталостную долговечность и сопротивление хрупкому разрушению / ЦНИИПСК им. Мельникова. –М, 2005.
  14. Стрелецкий Н.С. Курс металлических конструкций. Ч.1 -М: Стройиздат наркомстроя, 1940.
  15. Троицкий П.Н., Левитанский И.В. Исследования действительной работы сварного рамного узла крепления и рекомендации по его расчету./ Материалы по металлическим конструкциям. Выпуск 19. ЦНИИпроектсальконструкция. – М., 1977. – С. 120-130.
  16. Файбишенко В. К. Металлические конструкции: Учеб. пособие для вузов. –М.: Стройиздат, 1984. –336 с., ил.

**Алпатов Вадим Юрійович** є заступником першого проректора (з науки та інновацій) Самарського державного архітектурно-будівельного університету, доцентом кафедри "Металеві і дерев'яні конструкції". Наукові інтереси: оптимальне проектування металевих конструкцій будинків і споруд різного призначення, питання створення полегшених металевих конструкцій, просторові конструкції покрить будинків і споруд.

**Холопов Ігор Серафимович** є завідувачем кафедри "Металеві і дерев'яні конструкції", директором Будівельного інституту Самарського державного архітектурно-будівельного університету, доктор технічних наук, професор. Академік Академії транспорту РФ, Радник РААСН, заслужений працівник вищої школи. Наукові інтереси: теорія оптимального проектування металевих стержневих систем, розрахунок будинків на пульсаційні і сейсмічні впливи.

**Алпатов Вадим Юрьевич** является заместителем первого проректора (по науке и инновациям) Самарского государственного архитектурно-строительного университета, доцентом кафедры "Металлические и деревянные конструкции". Научные интересы: оптимальное проектирование металлических конструкций зданий и сооружений различного назначения, вопросы создания облегченных металлических конструкций, пространственные конструкции покрытий зданий и сооружений.

**Холопов Игорь Серафимович** является заведующий кафедрой "Металлические и деревянные конструкции", директором Строительного Института Самарского Государственного Архитектурно-Строительного Университета, доктор технических наук, профессор. Академик Академии Транспорта РФ, Советник РААСН, заслуженный работник высшей школы. Научные интересы: теория оптимального проектирования металлических стержневых систем, расчет зданий на пульсационные и сейсмические воздействия.

**Alpatov Vadim Yur'yevich** is a deputy pro-rector in science and innovations of Samara State University of Architecture and Civil Engineering, an Associate professor of the department "Metal and Wood Structures". Scientific interests: an optimum designing of metal building structures of various purposes, creation of lightweight metal designs, spatial structures of building and structure coverings.

**Kholopov Igor Serofimovich** is Head of the Department "Metal and Wood Structures", director of Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Dr. Sc. (Eng.), professor. An academician of the Academy of Transport of the Russian Federation, an adviser of the RAABS, an Honored Worker of higher school. Scientific interests: theory of an optimum designing of metal rod systems, calculation of buildings on pulsation and seismic influences.