

**Оптимизация параметров конструкций путем применения сталей
различной прочности**

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка конструктивных и расчетных схем, которые могут найти применение при проектировании бистальных несущих конструкции, обеспечивающих оптимизацию их параметров путем применения сталей различной прочности. **Метод.** Исследование основано на теории и методах оптимизации конструкций. **Результат.** Разработаны и скомпонованы рациональные конструктивные схемы балочных конструкций и ступенчатых колонн производственных зданий. На отдельных примерах исследуется расход металла и его стоимость при различных вариантах компоновки балок и колонн. Даются необходимые расчетные формулы и рекомендации, которые могут найти применение в практике проектирования и строительства металлических балок и колонн. **Вывод.** Построенные конструктивные схемы и алгоритм расчета свидетельствует об эффективности применения сталей различной прочности при конструировании балок и колонн.

Ключевые слова: стали, обычная и повышенная прочность, расчётные сопротивления, конструктивная и расчётная схема, сечения, графики, узлы, отправочные марки

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Оптимизация параметров конструкций путем применения сталей различной прочности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(2): 232-240. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-232-240

Optimization of structural parameters by using steels of different strengths

A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to develop design and calculation schemes that can be used in the design of bistal load-bearing structures, ensuring optimization of their parameters by using steels of different strengths. **Method.** The research is based on the theory and methods of structural optimization. **Result.** Rational structural diagrams of beam structures and stepped columns of industrial buildings have been developed and assembled. Using individual examples, the consumption of metal and its cost are examined for various options for the layout of beams and columns. The necessary calculation formulas and recommendations are given that can be used in the practice of design and construction of metal beams and columns. **Conclusion.** The constructed structural diagrams and calculation algorithm indicate the effectiveness of using steels of different strengths in the design of beams and columns.

Keywords: steel, normal and increased strength, design resistance, structural and design diagram, sections, graphs, nodes, shipping marks

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Optimization of structural parameters by using steels of different strengths. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(2): 232-240. DOI:10.21822 /2073-6185-2024-51-2-232-240

Введение. Как известно, внутренние усилия в несущих конструкциях меняются по пролету здания и по контуру рамы в общем случае [9,10]. Обычно при проектировании несущих конструкции предусматривают переменные сечения по пролету здания, в соответствии с переменными эпюрами изгибающих моментов и поперечных сил. Такое решение позволяет уменьшить собственный вес всей конструкции. При этом технология изготовления отдельных узлов конструкции [1-3] существенно усложняется. И в целом конструкция становится по стоимости дороже.

Как показывают исследования, проблему уменьшения собственного веса конструкции рационально обеспечивать, применяя в несущих элементах из сталей различной прочности: в перегруженных участках — стали повышенной прочности или высокопрочные стали, а в менее загруженных участках конструкции — стали обычной прочности. При этом, сохраняя сечения элементов конструкции постоянным по пролету, можно обеспечить высокую технологичность изготовления, транспортировки и монтажа конструкции. Таким образом, в случае применения бистальных конструкции ее собственный вес существенно уменьшается, технология изготовления упрощается, при этом стоимость конструкции в целом, как показывают исследования, также снижается.

Постановка задачи. Обычно при проектировании балок и колонн с целью снижения собственного веса, конструкции komponуются переменного сечения. Это обеспечивает, с одной стороны, уменьшение собственного веса, а с другой — усложняет технологию транспортировки, изготовления и монтажа. Уменьшение собственного веса можно обеспечить и другими конструктивными приёмами. В частности, путём применения сталей различной прочности: на участках конструкции, где напряжения высокие, применяются стали повышенной прочности, а на других участках стали обычной прочности, сохраняя при этом сечения элементов постоянными по пролёту или по высоте. Это позволяет уменьшить собственный вес конструкций, не усложняя технологии изготовления, транспортировки и монтажа конструкции. В статье рассматриваются вопросы, связанные с решением этой проблемы.

Методы исследования. Подбор сечения состоит в определении размеров поясов и стенки балки, исходя из заданных эксплуатационных условий, экономичности, прочности, устойчивости и технологичности изготовления. Балки составного сечения применяют в случаях, когда прокатные балки не удовлетворяют условиям прочности, жесткости, общей устойчивости, т.е. при больших пролетах и больших изгибающих моментах или когда нет необходимых прокатных балок. Сечение сварных балок в простейшем случае состоит из 3 листов: вертикальной стенки и двух горизонтальных полок (поясов), которые свариваются на заводе автоматической сваркой. Высота балки определяется экономическими соображениями, прочностью, максимально допустимым прогибом балки и, в ряде случаев, строительной высотой конструкции перекрытия.

Наибольшая высота h_{onm} чаще всего диктуется [4,7] экономическими соображениями. Из опыта проектирования следует учесть, что в балке оптимальной высоты масса стенки примерно равна массе двух поясов балки. Наименьшая рекомендуемая высота балки определяется жесткостью балки — её предельным прогибом (второе предельное состояние). Минимальная высота балок обеспечивает необходимую жесткость при полном использовании несущей способности материала. Высоту главной балки лучше всего взять ближе к оптимальной высоте. Она не должна превышать строительной высоты перекрытия и должна быть больше минимальной высоты.

Толщина стенки после высоты балки является вторым основным параметром сечения, т.к. сильно влияет на экономичность сечения составной балки. В высоких балках целесообразно толщину стенки проектировать в пределах $1/200 \div 1/250$ высоты. Обычно минимальную толщину стенки принимают не менее 8 мм (и реже 6 мм).

В сварных балках пояса обычно проектируют из листов универсальной полосовой стали. Толщину горизонтального поясного листа сварной балки обычно назначают равной

2 – 3 толщинам стенки. Применение поясных листов толщиной более 30 мм нерационально, так как толстые листы имеют пониженное расчетное сопротивление. Ширину поясных листов обычно принимают равной $1/2 \div 1/5$ высоты балки из условия обеспечения общей и местной устойчивости балки. В бистальных балках сечение конструкции по пролету – постоянное, а расчетное сопротивление стали – переменное.

Как было указано выше, уменьшение собственного веса конструкции, можно получить не только за счет изменения сечения конструкции по пролету, но и путем применения разно- прочных сталей. В практике проектирования и строительства широкое применение находят, так называемые, бистальные балки (рис.1) [1,8].

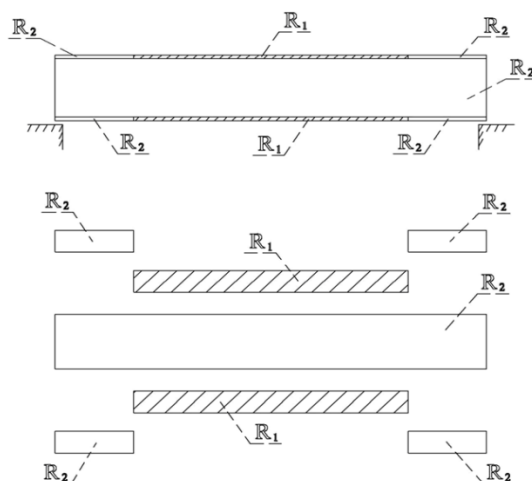


Рис. 1. Конструктивная схема и детализовка бистальной балки

Fig. 1. Structural diagram and detailing of a bistal beam

На рис.1 R_1 – расчетное сопротивление стали с повышенной прочностью или высокопрочной стали; R_2 – расчетное сопротивление стали обычной прочности; $R_1 > R_2$; $R_1 = (295-390)$ МПа – для сталей повышенной прочности; $R_1 = (440 \div 750)$ МПа - для высокопрочных сталей; $R_2 = (185-285)$ МПа. – для сталей обычной прочности.

Далее приведем диаграммы [1,6] растяжении сталей обычной прочности, повышенной прочности и высокопрочной стали. Как видно из рис.2, стали обычной прочности обладают развитой площадкой текучести. Высокопрочные стали не обладают площадкой текучести, эти стали - хрупкие. Стали повышенной прочности обладают небольшой площадкой текучести, которой обычно пренебрегают при расчетах.

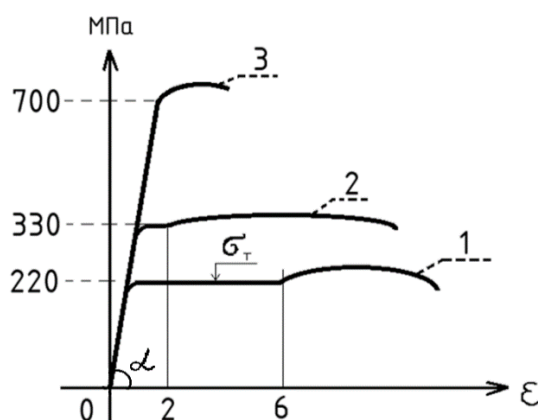


Рис. 2. Диаграммы растяжения сталей

Fig. 2. Tensile diagrams for steels

1– Стали обычной прочности; 2- Стали повышенной прочности; 3–Высокопрочные стали. $\tan \alpha = E$ – модуль упругости сталей; $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа – одинаков для всех строительных сталей.

В середине пролёта изгибающие моменты значительные. Поэтому верхние и нижние пояса (полки) балки перегружены по сравнению с участками, близкими к опорам. По этой причине в средней части пролёта пояса назначаем из сталей повышенной прочности или из высокопрочных сталей.

На рис. 1 пояса с повышенной прочностью заштрихованы. Другие части конструкции – из сталей обычной прочности. При этом сечение балки по пролёту остается постоянным, что упрощает технологию изготовления, транспортировки и монтажа бистальной балки.

Для примера, примем для поясов в средней части пролёта сталь с повышенной прочностью: $R_1 = 355$ МПа (09Г2С-гп.2 – марка стали), а в других частях конструкции — сталь обычной прочности: $R_2 = 230$ МПа (Вст3сп5-1 – марка стали).

Рассмотрим напряженное состояние сечения двутавровой бистальной балки (рис.3). Из условия равновесия сечения вытекает следующее равенство:

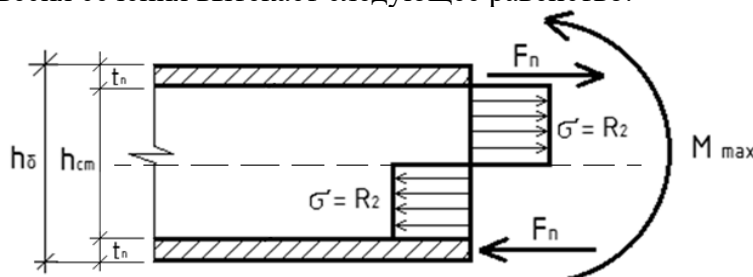


Рис. 3. Распределение напряжений по сечению двутавровой балки, из одной стали обычной прочности

Fig. 3. Stress distribution across the cross-section of an I-beam made of one steel of normal strength

На рис.3 дана схема распределения напряжений по высоте сечения двутавровой балки. Балка выполняется из одной стали – из стали обычной прочности с пределом прочности R_2 . Поскольку эта сталь имеет большую площадку текучести (рис. 2), то пластические деформации полностью заполняют стенку балки по высоте. Именно это положение учтено на рис.3. В случае бистальной балки (полки - из стали повышенной прочности, с пределом прочности R_1 , а стенка – из стали обычной прочности, с пределом прочности R_2) пластические деформации не развиваются в сечении стенки балки, поскольку сталь повышенной прочности, из которой выполнена полка, не дает развиваться пластическим деформациям. У этой стали площадка текучести очень маленькая, которой можно пренебречь (рис. 2).

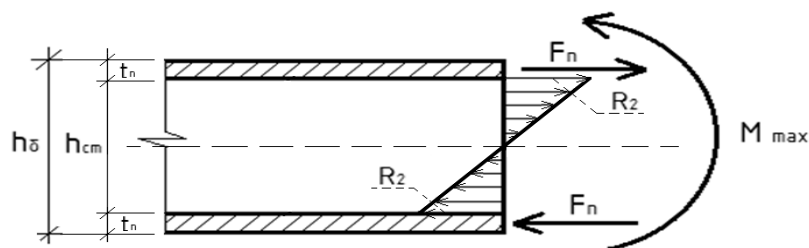


Рис. 4. Распределение напряжений по сечению двутавровой бистальной балки, полки из стали повышенной прочности, стенка – из стали обычной прочности

Fig. 4. Stress distribution across the cross-section of an I-beam, flanges made of high-strength steel, wall made of normal-strength steel

Далее, рассмотрим рис. 4. Из условия равновесия из этой схемы вытекает следующее равенство

$$M_{max} = t_{ct} \cdot R_2 \cdot \frac{h_{ct}^2}{6} + F_n \cdot h_0$$

С высокой точностью можно принять $h_0 = h_{ct}$ (рис.4).

Тогда из этого равенства следует площадь сечения одной полки в середине пролёта:

$$A_n = \frac{1}{h_6 \cdot R_1} \cdot \left(M_{max} - t_{ст} \cdot R_2 \cdot \frac{h_6^2}{6} \right). \quad (1)$$

Здесь усилие в поясе определяется формулой

$$F_n = A_n \cdot R_1$$

Как следует из (рис.4):

$$t_{ст} = 1 \text{ см}, R_2 = 230 \text{ МПа} = 230 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}; R_1 = 355 \text{ МПа} = 355 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

$$M_{max} = 3034 \text{ кН} \cdot \text{м}; h_6 = 1,29 \text{ м}$$

Подставляя эти значения в формулу (1), получаем $A_n = 52 \text{ см}^2$

Как показано на рис. 4, толщина пояса балки равна $t_n = 2 \text{ см}$.

$$\text{Отсюда следует: } v_n \cdot t_n = A_n, \quad v_n = \frac{A_n}{t_n} = \frac{52 \text{ см}^2}{2 \text{ см}} = 26 \text{ см}$$

В сортаменте имеется полосовая сталь толщиной $t_n = 2 \text{ см}$ и шириной $v_n = 26 \text{ см}$.

Поэтому назначаем полку бистальной балки размерами: $t_n = 2 \text{ см}$, $v_n = 26 \text{ см}$.

В случае двутавровой балки из одной стали обычной прочности, как следует из рис.

4 ширина полки была в середине пролета $v_n = 42 \text{ см}$.

В случае бистальной балки эта ширина уменьшилась и стало равной $v_n = 26 \text{ см}$.

Ширина пояса балки уменьшилась на 38% :

$$\frac{42 \text{ см} - 26 \text{ см}}{42 \text{ см}} \cdot 100\% \approx 38\%$$

Обсуждение результатов. Возникает вопрос: как влияет на стоимость конструкции применение сталей повышенной прочности? Чтобы ответить на этот вопрос рассмотрим пример. Прежде, приведем таблицу стоимостей сталей (табл. 1)

Таблица 1. Классификация сталей по прочности
Table 1. Classification of steels by strength

№	Классификация сталей по прочности Classification of steels by strength	Стоимость одной тонны стали Cost of one ton of steel
2	Стали обычной прочности Normal strength steel	55 тысяч рублей
3	Стали повышенной прочности High strength steels	60 тысяч рублей
4	Высокопрочные стали High strength steels	65 тысяч рублей

Рассмотрим вариант, когда верхняя полка имеет размеры, которые даны на рис. 5

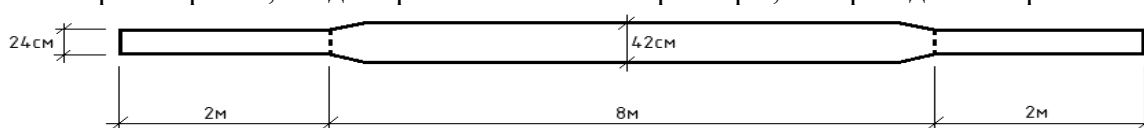


Рис. 5. Схема полки в плане

Fig. 5. Shelf plan diagram

Толщина полки $t_n = 2 \text{ см} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Вычислим объем полки, когда она выполнена из стали обычной прочности:

$$V_1 = 2 \cdot 0,24 \text{ м} \cdot 2 \text{ м} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ м} + 8 \text{ м} \cdot 0,42 \text{ м} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 8,48 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

Вычислим объем полки, когда она выполнена из стали повышенной прочности.

Размеры полки даны на рис. 6.

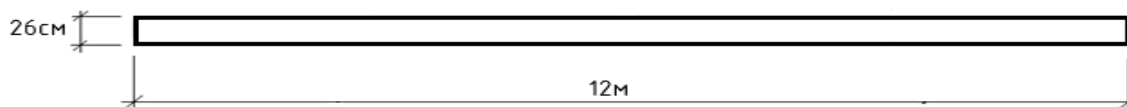


Рис. 6. Схема полки в плане

Fig. 6. Shelf plan diagram

Толщина полки, как и прежде, $t_n = 2 \text{ см} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Объем полки: $V_2 = 12 \text{ м} \cdot 0,26 \text{ м} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 6,24 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$

Собственный вес $P_1 = \rho \cdot V_1$, $P_2 = \rho \cdot V_2$, ρ – удельный вес стали:

$$\rho = 7,85 \frac{\text{тонн}}{\text{м}^3}.$$

В соответствии с таблицей 5 стоимость:

$$C_1 = P_1 \cdot 55 \text{ 000 руб} = \rho \cdot V_1 \cdot 55 \text{ 000 руб};$$

$$C_2 = P_2 \cdot 60 \text{ 000 руб} = \rho \cdot V_2 \cdot 60 \text{ 000 руб};$$

Объем полки в случае применения стали повышенной прочности уменьшилась.

Вычислим процент стоимости:

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100\% = \frac{\rho \cdot V_1 \cdot 55 \text{ 000 руб} - \rho \cdot V_2 \cdot 60 \text{ 000}}{\rho \cdot V_1 \cdot 55 \text{ 000 руб}} \cdot 100\%,$$

или

$$\frac{8,48 \cdot 55 \cdot 10^3 - 6,24 \cdot 60 \cdot 10^3}{8,48 \cdot 55 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 20,8 \%$$

Стоимость стали полки, в случае применения стали повышенной прочности, уменьшилась на 20,8 % по сравнению с полкой из обычной стали.

Отсюда можно сделать следующий вывод: применение сталей повышенной прочности уменьшает не только собственный вес конструкции, но уменьшает еще стоимость самой стали, затрачиваемый на изготовление конструкции.

В производственных зданиях применяются колонны 3-х видов [5,8]:

- постоянного по высоте сечения;
- переменного по высоте сечения – ступенчатые;
- в виде двух не жесткого связанных между собой ветвей – в виде, так называемых, отдельно стоящих колонн.

На рис. 7 дана конструктивная схема колонны постоянного по высоте сечения. Для опирания подкрановой балки предусмотрен консоль.

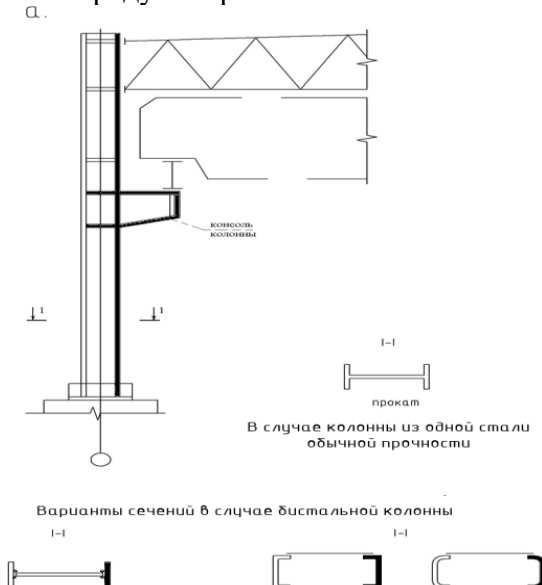


Рис. 7. Колонны постоянного по высоте

Fig. 7. Columns of constant section height

Внутренняя полка колонны сжата, а наружная – растянута. Сжатая полка имеет тенденцию к потере устойчивости. С целью усиления этой полки рационально ее проектировать из стали повышенной прочности. Все остальные элементы этой колонны – из стали обычной прочности. На схеме (рис.7) полка из стали повышенной прочности показана жирной линией. На схеме даны варианты сечения колонны.

На рис.8 приводится конструктивная схема колонны, ветви которой работают отдельно при воздействии вертикальной нагрузки. Эти ветви соединены между собой планками, как показано на рис.8. Учитывая, что подкрановая ветвь несет большую нагрузку от мостового крана, она проектируется из стали повышенной прочности. Все остальные элементы этой колонны – из стали обычной прочности.

В.

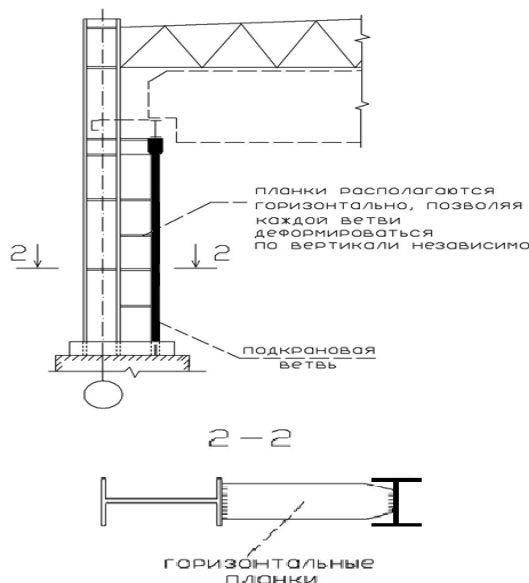


Рис. 8. Отдельно стоящая ступенчатая колонна
Fig. 8. Free-standing stepped column

На рис. 9 даны конструктивные схемы ступенчатых колонн. Это основной вид колонн промышленных зданий, где работают мостовые краны.

Основную нагрузку от мостовых кранов здесь несут подкрановые ветви, а шатровые ветви несут нагрузку от покрытия. Если мостовой кран имеет грузоподъемность более 100 тонн, то рационально подкрановые ветви колонн проектировать из стали повышенной прочности.

На схеме подкрановые ветви из стали повышенной прочности показаны жирными линиями.

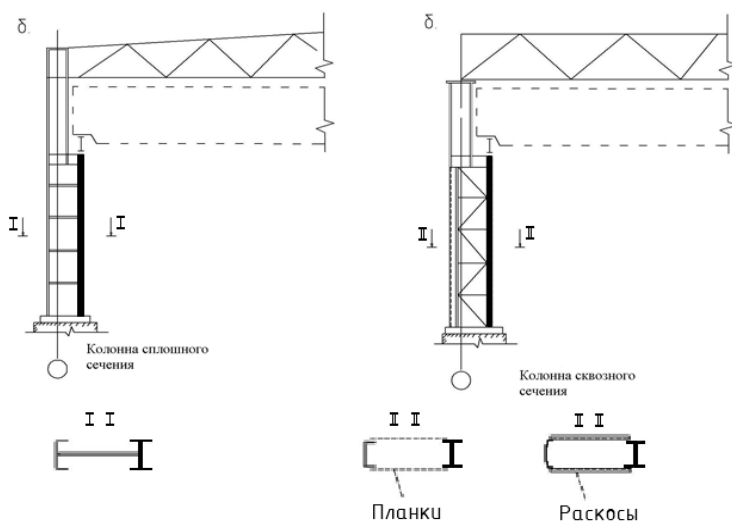


Рис. 9. Переменно ступенчатые колонны
Fig. 9. Variably stepped columns

Представляют интерес конструктивные схемы колонн средних рядов. На рис.10 даны соответствующие конструктивные схемы. Жирными линиями показаны ветви колонн из сталей повышенной прочности. По нашему мнению, в будущем найдут

широкое применение бистальные колонны, конструктивные схемы которых были изложены выше.

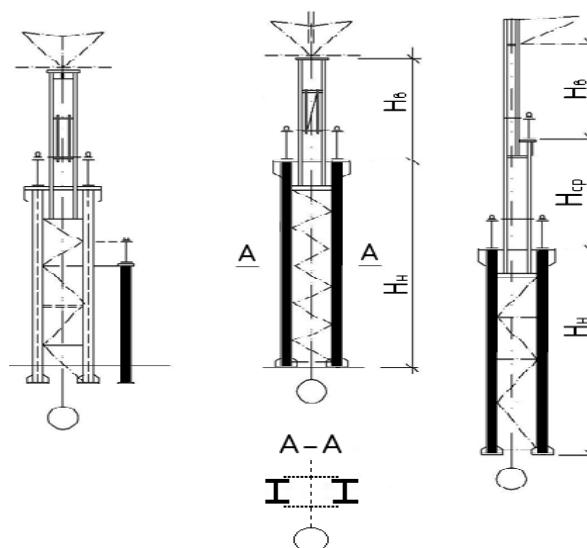


Рис. 10. Конструктивные схемы ступенчатых колонн средних рядов

Fig. 10. Design diagrams of stepped columns of the middle rows

Мостовой кран опирается на консоль. Такие колонны просты в изготовлении и технологичны при монтаже. Применяются при $Q = 15 \div 20$ тонн при легких мостовых кранах. Подкрановая ветвь несет только вертикальную нагрузку от мостового крана. Шатровая же – только нагрузку от шатра (покрытия, ветра и тормозные силы от крана).

Отдельно стоящие колонны применяются в универсальных производственных зданиях. Они позволяют, не нарушая работы в целом рамы (удалив горизонтальные планки), поменять подкрановую ветвь – другого сечения, другой высоты (при реконструкции зданий). Ступенчатые колонны, основной тип колонн – способный нести $Q = 30 - 300$ тонн – грузоподъемность мостового крана.

Приведённые в статье результаты исследования свидетельствуют об эффективности применения бистальных конструкций, балках и колоннах.

Их эффективность заключается в уменьшении собственного веса конструкции, снижения её стоимости и упрощения технологии изготовления, транспортировки и монтажа. Построенные конструктивные расчётные схемы и приведённые примеры подтверждают практическую значимость результатов проведенного исследования, а также возможность их применения при проектировании зданий и сооружений.

Вывод. В связи с увеличением доли металлических конструкций в строительстве возникает проблема уменьшения затрат стали. Как известно, в строительных несущих конструкциях внутренние усилия меняются по пролету и по контуру конструкции.

Обычно с целью уменьшения собственного веса конструкции komponуют переменного по пролету сечения. Однако это существенно усложняет технологию, транспортировку и монтажа конструкции.

Проблему уменьшения собственного веса можно решить и иначе: в перегруженных участках конструкции применять стали повышенной прочности или высокопрочные стали, а на других участках конструкции использовать стали обычной прочности.

Такой подход позволяет существенно уменьшить собственный вес конструкции при снижении стоимости стали, затрачиваемой на изготовление конструкции.

Рассмотрены конструкции бистальных балок, даны соответствующие схемы и методика расчета, приведены примеры расчета, проведена оценка расхода на изготовление бистальных балок.

Библиографический список:

1. Металлические конструкции. Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2008. - 691с.
2. Металлические конструкции, Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986. - 560 с.
3. Металлические конструкции (специальный курс) – 2-е изд. под редакцией Беленя Е.Н., Москва, Стройиздат, 1976. – 600 с.
4. Проектирование и расчет стальных балочных клеток. О.В. Евдокимцев, О.В. Умнова, Тамбов, ТГТУ, 2005.-84с.
5. Рекомендации по проектированию конструкций каркаса. – Э.Л. Айрумян, Москва, 2004.- 242с.
6. Материалы по металлическим конструкциям – Москва, 1977.- 215с.
7. Металлические конструкции. В.К. Файбишенко, Москва, Стройиздат, 1984.-336с.
8. Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании» Юсупов А.К. ДГТУ, Махачкала. ГУП «Типография ДНЦ РАН». 2010 -100с.
9. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Свод правил. Москва, Стройиздат, 2017. - 126 с.
10. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Свод правил – Москва, Стройиздат, 2016. – 95 с.,

References:

1. Metal structures. Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2008; 691. (In Russ)
2. Metal structures, E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986; 560. (In Russ)
3. Metal structures (special course) – 2nd ed. edited by Belen E.N., Moscow, Strooiizdat, 1976; 600. (In Russ)
4. Design and calculation of steel beam cages. O.V. Evdokimtsev, O.V. Umnova, Tambov, TSTU, 2005;84. (In Russ)
5. Recommendations for the design of frame structures. E.L. Ayrumyan, Moscow, 2004; 242. (In Russ)
6. Materials on metal structures. Moscow, 1977; 215. (In Russ)
7. Metal structures. VC. Faybishenko, Moscow, Stroyizdat, 1984;336. (In Russ)
8. Metal structures in questions, answers and design” Yusupov A.K. DSTU, Makhachkala. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS". 2010;100. (In Russ)
9. SP 16.13330.2017 “Steel structures”. Set of rules. Moscow, Strooiizdat, 2017; 126. (In Russ)
10. SP 20.13330.2016 “Loads and impacts.” Code of rules. Moscow, Strooiizdat, 2016; 95(In Russ)

Сведения об авторах:

Юсупов Абусупян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Вишталов Раджаб Исабекович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M. Muselemov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Department of Building Structures and Hydrotechnical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 21.02.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 15.03.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 15.032024.