

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1051-1060

Оценка жесткости баз внецентренно нагруженных стальных колонн по EN 1993-1-8

Андрей Брониславович Шурин, Игорь Владимирович Зинкевич*Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь*

АННОТАЦИЯ

Введение. Практика проектирования металлоконструкций показывает, что действительная работа конструкций узловых сопряжений практически никогда не является «чистым» шарниром и не существует «абсолютно жесткого» соединения элементов. В EN 1993-1-8 узлы металлических конструкций классифицируются как жесткие, номинально-шарнирные и полужесткие в зависимости от соотношения начальной вращательной жесткости узла и редуцируемой погонной жесткости. Актуальность исследования заключается в уточнении критериев отнесения баз внецентренно сжатых колонн к жестким, что позволит использовать методику EN 1993-1-8 в отечественной практике проектирования.

Материалы и методы. Применен сравнительный анализ типовых решений баз внецентренно сжатых колонн и произведена оценка их жесткости по EN 1993-1-8. Выполнен анализ влияния податливости баз внецентренно сжатых колонн одноэтажных промышленных зданий со смещаемой рамой на расчетную длину колонны и коэффициент снижения расчетного сопротивления (прочности) по пределу текучести.

Результаты. Приведена классификация узлов стальных конструкций с точки зрения конструктивной работы в соответствии с отечественной практикой проектирования стальных конструкций, базирующейся на СНиП II-23 (СП 16.13330). Представлены отличия в классификации узлов в зависимости от их вращательной жесткости по EN 1993-1-8. Проведена оценка жесткости баз типовых колонн и разработаны рекомендации по изменению критерия их классификации.

Выводы. Выполнена оценка жесткости типовых внецентренно нагруженных баз колонн. Установлено, что более 50 % типовых баз колонн попадают в разряд полужестких, что в соответствии с требованиями EN 1993-1-8 недопустимо. На жесткость баз колонн толщина плиты и класс прочности бетона фундамента влияют в меньшей степени. Жесткость на 60 % зависит от марки (класса) стали и диаметра анкерных болтов и высоты колонны. На основании этого рекомендуется пересмотр конструктивных решений, принятых в типовых решениях, или критериев отнесения типа базы колонны к жесткой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Еврокод, внецентренно сжатые колонны, шарнирный узел, полужесткий узел, жесткий узел, база колонны, вращательная жесткость, угол поворота узла, анкерный болт

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шурин А.Б., Зинкевич И.В. Оценка жесткости баз внецентренно нагруженных стальных колонн по EN 1993-1-8 // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1051–1060. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1051-1060

Автор, ответственный за переписку: Андрей Брониславович Шурин, shuryn@mail.ru.

Stiffness assessment of bases of off-centre loaded steel columns according to EN 1993-1-8

Andrei B. Shuryn, Igor V. Zinkevich*Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus*

ABSTRACT

Introduction. The practice of metal structure design shows that the actual performance of nodal joint structures is almost never a “pure” hinge, and there is no “absolutely rigid” connection of elements. In EN 1993-1-8, metal structure assemblies are classified as rigid, nominally hinged and semi-rigid depending on the ratio of the initial rotational stiffness of the assembly to the reduced linear stiffness. The relevance of this study lies in the clarification of the criteria for classifying the bases of off-centre compressed columns as rigid, which will allow the EN 1993-1-8 methodology to be used in domestic design practice.

Materials and methods. The study uses comparative analysis of typical solutions for the bases of off-centre compressed columns and assesses their stiffness according to EN 1993-1-8. An analysis of the influence of the pliability of the bases of off-centre compressed columns of single-storey industrial buildings with a sway frames on the design length of the column and the yield strength reduction factor has been performed.

Results. Classification of steel structure assemblies from the point of view of structural performance is given, in accordance with the domestic practice of steel structure design based on SNiP II-23 (CP 16.13330). Differences in the classification of assemblies depending on their rotational stiffness according to EN 1993-1-8 are presented. The stiffness of bases of typical columns is evaluated and recommendations for changing the criterion of their classification are developed.

Conclusions. The stiffness of typical off-centre loaded column bases was assessed. It was found that more than 50 per cent of typical column bases are semi-rigid, which is unacceptable according to EN 1993-1-8. The stiffness of the column bases is less affected by the thickness of the slab and the strength class of the foundation concrete. The stiffness is 60 % dependent on the steel grade and diameter of the anchor bolts and the height of the column. Based on this, it is recommended to revise the design solutions adopted in the standard solutions or the criteria for classifying the column base type as rigid.

KEYWORDS: Eurocode, off-centre loaded columns, nominally pinned joint, semi rigid joint, rigid joint, base of column, rotational stiffness, rotation of a joint, anchor bolt

FOR CITATION: Shuryin A.B., Zinkevich I.V. Stiffness assessment of bases of off-centre loaded steel columns according to EN 1993-1-8. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1051-1060. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1051-1060 (rus.).

Corresponding author: Andrei B. Shuryin, shuryin@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Практика проектирования металлоконструкций показывает, что действительная работа конструкций узловых сопряжений практически никогда не является «чистым» шарниром и не существует «абсолютно жесткого» соединения элементов. Реальная работа всех узлов в той или иной степени полужесткая, податливая, так как не учитываются трение элементов, их размеры, вращательная жесткость и другие факторы. В EN 1993-1-8¹ узлы металлических конструкций классифицируются как жесткие, номинально-шарнирные и полужесткие в зависимости от соотношения начальной вращательной жесткости узла и редуцируемой погонной жесткости.

Цель исследования — оценка жесткости внецентренно сжатых баз стальных колонн из широкополочных двутавров, запроектированных в соответствии с требованиями СНиП II-23 по шифру 8397 для одноэтажных зданий с покрытием типа «Молодечно»². Актуальность данного исследования заключается в уточнении критериев отнесения баз внецентренно сжатых колонн к жестким, что позволит использовать методику EN 1993-1-8 в отечественной практике проектирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании применен сравнительный анализ типовых решений баз внецентренно сжатых колонн и произведена оценка их жесткости по EN 1993-1-8.

Еврокоды (Eurocode) — комплект гармонизированных стандартов для расчета несущих строительных конструкций, разработанных техническим комитетом CEN/TC 250 и устанавливающих единые подходы к проектированию несущих строительных конструкций. Проектированию стальных конструкций посвящена часть EN 1993-1, которая содержит двенадцать подчастей, EN 1993-1-1–EN 1993-1-12, каждая из которых касается конкретных аспектов проектирования стальных элементов, предельных состояний или материалов. Настоящая статья продолжает цикл исследований, посвященных опыту использования европейских нормативных документов при проектировании стальных конструкций [1–3].

Результаты сравнительного анализа систематизированы и схематизированы в графическом и табличном виде. Выполнен анализ влияния податливости баз внецентренно сжатых колонн одноэтажных промышленных зданий со смещаемой рамой на расчетную длину колонны и коэффициент снижения расчетного сопротивления (прочности) по пределу текучести.

С точки зрения конструктивной работы в соответствии с отечественной практикой проектирования стальных конструкций, базирующейся на СНиП II-23 (СП 16.13330)³, узлы стальных конструкций классифицируются на жесткие и шарнирные.

Жесткие узлы стальных конструкций образуют рамную систему, способную воспринимать и передавать изгибающий момент между элементами, которые сходятся в узле, не допуская взаимного поворота в защемлении. Такое примыкание придает жесткость всему каркасу здания, позволяя избежать или уменьшить постановку невыгодных с архитектурной точки зрения связей. Кроме того, жесткие узлы дают возможность не только снизить изгибающие моменты в пролете элементов металлоконструкций, но и их прогибы. Но конструирование жестких узлов накладывает повышенные требования к заводским и монтажным сварным швам, качеству высокопрочных болтов и к химическому составу стали, что существенно увеличивает стоимость металлоконструкций. К жестким узлам относятся равнопрочные сварные соединения металлопроката, фланцевые и фрикционные на высокопрочных болтах.

Шарнирные узлы обеспечивают передачу только продольных и поперечных усилий, избегая изгибающих моментов. При этом в шарнирных узлах допускается поворот между примыкающими элементами. К шарнирным узлам относятся примыкания балок на болтах класса точности В, опирание через опорное ребро и т.д. (рис. 1). Шарнирные узлы — наименее дорогостоящие вследствие пониженных требований к точности и качеству изготовления и монтажа. При шарнирной схеме примыкания элементов жесткость каркаса должна быть

¹ ТКП EN 1993-1-8 (EN 1993-1-8:2005, IDT). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–8. Расчет соединений. 2020. 128 с.

² Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. Шифр 8397 «Стальные колонны из широкополочных двутавров и связи из гнутосварных профилей для одноэтажных зданий с покрытием типа «Молодечно». Вып. 2. Конструкции для зданий высотой до низа ферм бескрановых 6,0, 7,2, 8,4 м; с мостовыми кранами — 8,4, 9,6, 10,8 м. Чертежи КМ. ГПИ Ленпроектстальконструкция.

³ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81*. 2017. 140 с.

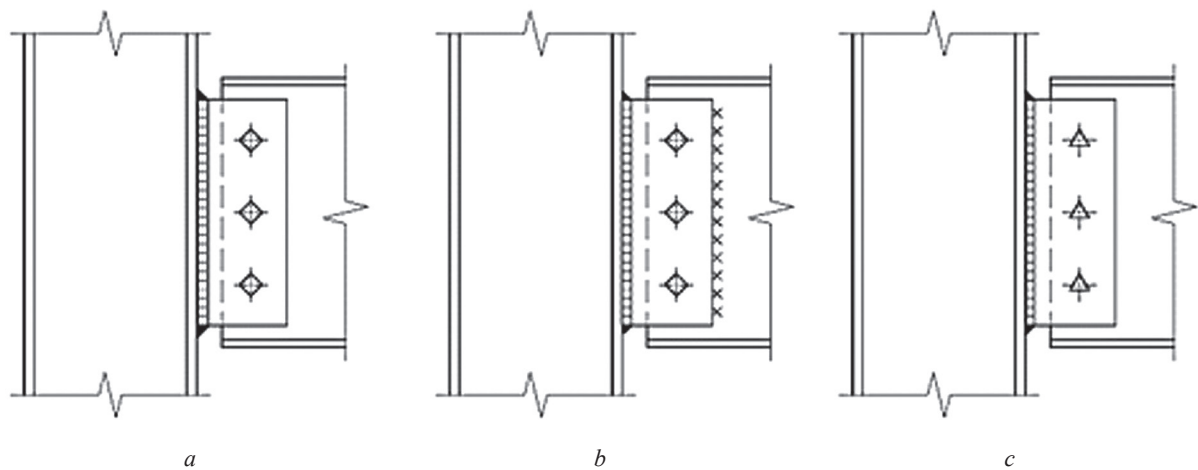


Рис. 1. Узловые соединения металлоконструкций, относящиеся к шарнирным по СНиП II-23
Fig. 1. Nodal joints of metal structures related to nominally pinned to SNiP II-23

обеспечена постановкой связей, ядер жесткости и т.д.

Практика проектирования металлоконструкций показывает, что действительная работа конструкций узловых сопряжений практически никогда не является «чистым» шарниром и не существует «абсолютно жесткого» соединения элементов. Реальная работа всех узлов в той или иной степени полужесткая, податливая, поскольку не учитываются трение элементов, их размеры, вращательная жесткость и другие факторы [4–7].

В соответствии с требованиями п. 5.2.2.5(1) EN 1993-1-8 узлы металлических конструкций классифицируются как жесткие, номинально-шарнирные и полужесткие в зависимости от соотношения начальной вращательной жесткости узла $S_{j,ini}$ и редуцируемой погонной жесткости $k_b \cdot E \cdot J_b / L_b$, где J_b — момент инерции поперечного сечения балки в плоскости действия момента; J_c — момент инерции поперечного сечения колонны в плоскости действия момента; L_b — пролет балки (расстояние между центрами колонн); L_c — высота колонны в пределах рассматриваемого этажа; i_b — среднее значение погонной жесткости J_b / L_b для всех балок данного этажа; i_c — среднее значение погонной жесткости J_c / L_c для всех колонн данного этажа; k_b — коэффициент, принимаемый для номинально-шарнирных узлов $k_b = 0,5$ (зона 3, рис. 2). Для жестких узлов в каркасах зданий с системой, уменьшающих горизонтальные перемещения не менее чем на 80 %, $k_b = 8$, для свободных рам при отношении $\frac{i_b}{i_c} \geq 0,1$ коэффициент $k_b = 25$ (зона 1, рис. 2). При отношении $\frac{i_b}{i_c} < 0,1$ узлы свободных рам следует классифицировать как полужесткие (зона 2, рис. 2).

Поэтому при классификации узлы металлических конструкций, приведенные на рис. 1, b, c,

с большей долей вероятности будут отнесены к разряду полужестких, что потребует внесения корректировки жесткостных характеристик узлов в расчетной схеме.

В соответствии с отечественной практикой проектирования к типовым жестким сопряжениям колонн с фундаментами относятся конструктивные решения баз (рис. 3).

Исследования в области классификации баз колонн в Европе были проведены в 90-х гг. XX в. и представлены в публикациях [8, 9]. Разработанные критерии классификации жесткости^{4, 5} [10–13] включены в комплект европейских нормативных документов по проектированию стальных конструкций (EN 1993-1-8). В основе классификации лежит 5%-ный критерий, когда базы считаются жесткими, если их фактическое поведение при вращении не влияет на сопротивление рамы в предельном состоянии бо-

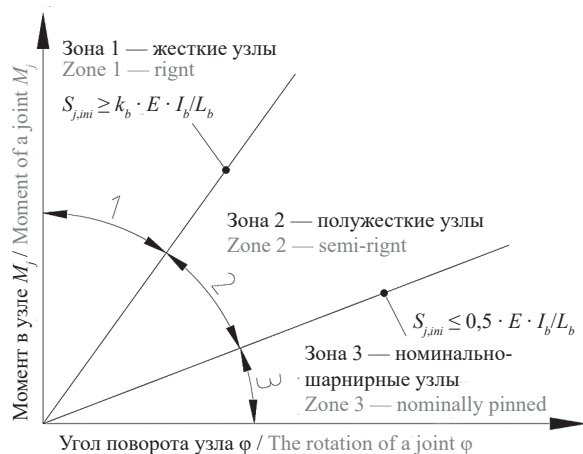


Рис. 2. Границы классификационных зон для узлов, кроме сопряжений баз колонн с фундаментами
Fig. 2. Classification boundaries for joints other than column bases are given

⁴ NCCI: Column base stiffness for global analysis SN045a-EN-EU. 9 p.
⁵ Steel buildings in Europe. Multi-Storey Steel Buildings. Part 5: Joint Design. 108 p.

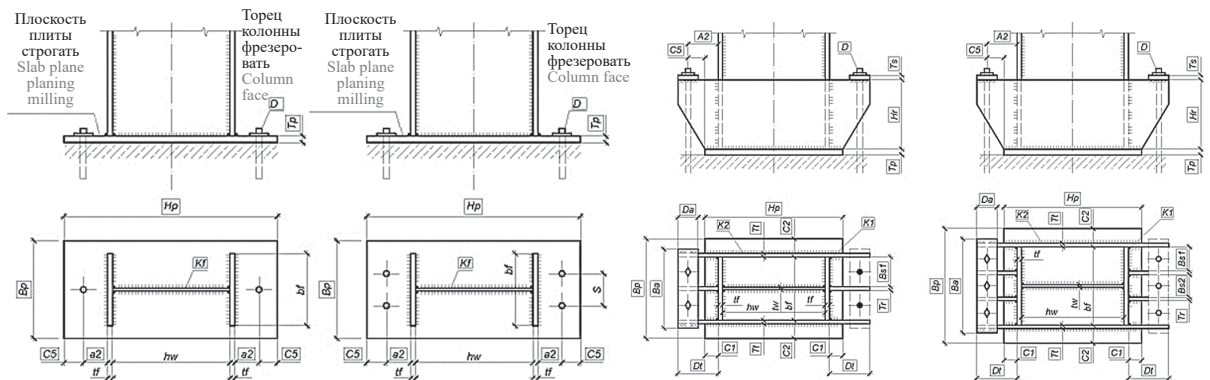
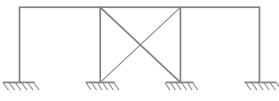


Рис. 3. Типовые решения жестких баз колонн при конструировании по СНиП II-23
Fig. 3. Typical solutions for rigid column bases during construction to SNiP II-23

Табл. 1. Начальная вращательная жесткость баз колонн
Table 1. The initial rotational stiffness of base of column

Рамы с системой связей, уменьшающих горизонтальные перемещения не менее чем на 80 %, и влиянием деформаций которых допускается пренебречь For frames where the bracing system reduces the horizontal displacement by at least 80 % and the influence of deformations of which can be neglected		Свободные (сдвигаемые) рамы Sway frames	
			
если $\bar{\lambda}_0 \leq 0,5$ if $\bar{\lambda}_0 \leq 0.5$	если $0,5 < \bar{\lambda}_0 < 3,93$ и if $0.5 < \bar{\lambda}_0 < 3.93$ and $S_{j,ini} \geq 7 \left(2 \cdot \bar{\lambda}_0 - 1 \right) \cdot E \cdot J_c / L_c$ (1) $S_{j,ini} \geq 7 \left(2 \cdot \bar{\lambda}_0 - 1 \right) \cdot E \cdot J_c / L_c$ (1)	если $\bar{\lambda}_0 \geq 0,5$ и if $\bar{\lambda}_0 \geq 0.5$ and $S_{j,ini} \geq 48 \cdot E \cdot J_c / L_c$ (2) $S_{j,ini} \geq 48 \cdot E \cdot J_c / L_c$ (2)	$S_{j,ini} \geq 30 \cdot E \cdot J_c / L_c$ (3)

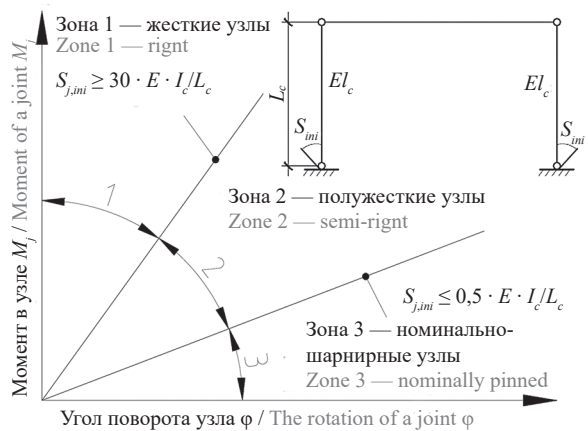


Рис. 4. Границы классификационных зон баз колонн с фундаментами для свободных рам
Fig. 4. Classification boundaries for joints column bases for sway frames

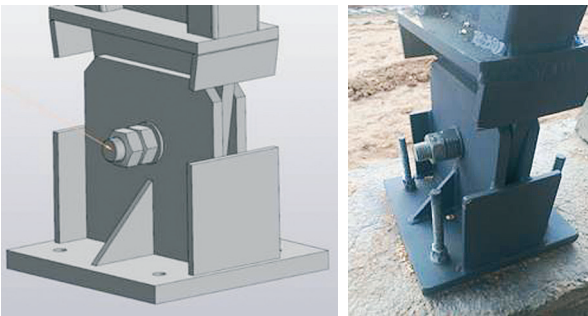


Рис. 5. Номинально-шарнирная база колонны (со штифтовым соединением)
Fig. 5. Nominally pinned column base (with pin connection)

более чем на 5 % и не влияет на горизонтальные перемещения при эксплуатационных нагрузках более чем на 10 % [12]. Согласно требованиям п. 5.2.2.5(2) EN 1993-1-8 базы колонн относятся к жестким, если выполняются условия табл. 1 (рис. 4).

Условия, позволяющие классифицировать базы колонны как шарнирные, определяются аналогично. Однако лишь немногие конструктивные решения баз колонн могут обладать низкой начальной вращательной жесткостью $S_{j,ini}$, достаточной для того, чтобы быть классифицированными как шарнирные. Шарнирная база колонны должна быть способна передавать внутренние усилия без создания значительных моментов, которые могли бы отрицательно сказаться на колоннах или конструкции каркаса в целом. База колонны также должна обладать достаточной способностью к вращению при расчетных нагрузках. На практике к номинально-шарнирным опорам могут относиться штифтовые (рис. 5), сферические и катковые опоры.

Полужесткие базы колонн — это те, которые не соответствуют критериям отнесения к категории жестких или номинально-шарнирных. Однако, принимая во внимание предыдущие соображения о соединениях со штифтами, большинство сопряжений баз колонн с фундаментами, которые не являются жесткими, будут относиться к полужестким [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценку жесткости типовых баз внецентренно сжатых колонн выполнили для шифра 8397 «Сталь-

ные колонны из широкополочных двутавров и связи из гнутосварных профилей для одноэтажных зданий с покрытием типа “Молодечно”, выпуск 2, для колонн высотой 6,0; 7,2; 8,4 и 9,6 м². Конструктивное решение типовой базы колонны приведено на рис. 6.

Расчет выполняем на предельные значения изгибающих моментов и осевых сил. Начальную вращательную жесткость $S_{j,ini}$ базы колонны, подверженной совместному действию осевой силы и изгибающего момента, определяем по формуле:

$$S_{j,ini} = \frac{E \cdot z^2}{1/k_T + 1/k_C} \cdot \frac{e}{e - e_k}, \tag{4}$$

где

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} \text{ — эксцентриситет в узле;}$$

$$k_T = \frac{1}{\frac{1}{2k_{15}} + \frac{1}{2k_{16}}} \text{ — эффективный коэффициент жесткости растянутой зоны;}$$

$$e_k = \frac{z_c \cdot k_c - z_c \cdot k_T}{k_T + k_c} \text{ — рис. 7.}$$

Коэффициенты жесткости в формуле (4) принимаем по табл. 2.

При расчете по EN 1993-1-8 вводим предположку, что опорная плита колонны «абсолютно жесткая», так как в отличие от типового решения (рис. 6) подкреплена дополнительными ребрами и траверсами, уменьшающими изгибающий момент в плите, а приваренные анкерные плитки уменьшают ее прогиб (рис. 7). Тогда коэффициент жесткости, учитывающий изгиб плиты в растянутой зоне фундамента k_{15} , можно принять равным бесконечности: $k_{15} = \infty$ (рис. 8).

Поверочные расчеты сводим в табл. 3.

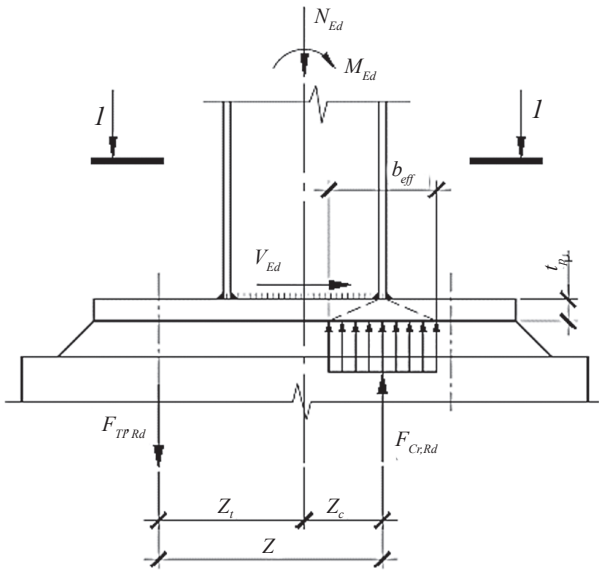


Рис. 7. К расчету базы внецентренно сжатой колонны
Fig. 7. Calculation of the base of an off-centre compressed column

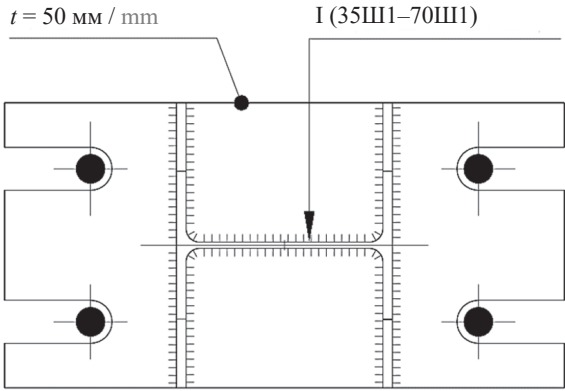


Рис. 6. Конструктивное решение типовой базы колонны по шифру 8397²
Fig. 6. Design solution of a typical column base according to code 8397²

На основании выполненных расчетов по оценке жесткости типовых баз колонн по шифру 8397² установлено, что к жестким относятся 42 % типовых решений (только для колонн с высотой 8,4 и 9,6 м). Остальные базы (более 50 %) попадают в разряд полужестких. Для отнесения их к жестким требуется существенное увеличение диаметра анкерных болтов или введение предпосылки абсолютно жесткой плиты. Увеличение толщины плиты не приводит к существенному повышению жесткости, что косвенно подтверждается в труде [15].

Таким образом, вызывает интерес, принятый в EN 1993-1-8 критерий оценки жесткости баз колонн свободных рам. Анализ ряда литературных источников показывает, что таким критерием может быть принято уменьшение упругой критической силы колонны более чем на 5 % [12, 16, 17]. При обычном, поэлементном расчете колонн используются инструменты снижения расчетного сопротив-

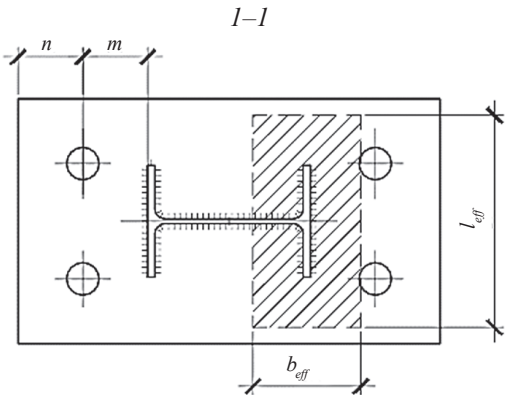


Табл. 2. Коэффициенты жесткости для баз колонн
Table 2. Stiffness coefficients for column bases

Компонент Component	Коэффициент жесткости k_i Stiffness coefficient k_i	
Бетон фундамента, включая стяжку или подливку под опорной плитой базы колонны Concrete in compression (including grout)	$k_C = k_{13} = \frac{E_c \cdot \sqrt{b_{eff} \cdot l_{eff}}}{1,275 \cdot E},$ где E_c — модуль упругости бетона фундамента; b_{eff} и l_{eff} — эффективная ширина и длина полки Т-образного элемента (рис. 7) where E_c — modulus of elasticity of foundation concrete; b_{eff} and l_{eff} — is the effective width and length of the T-stub flange (Fig. 7)	
Изгиб плиты базы колонны в растянутой зоне фундамента Base plate in bending under tension	С учетом усилий от эффекта рычага* With prying forces* $k_{15} = \frac{0,85 \cdot l_{eff} \cdot t_p^3}{2 \cdot m^3},$	Без учета усилий от эффекта рычага* Without prying forces* $k_{15} = \frac{0,425 \cdot l_{eff} \cdot t_p^3}{2 \cdot m^3},$
	где t_p — толщина опорной плиты базы колонны; m — принимать по рис. 7 where t_p — column base plate thickness; m — Fig. 7	
Растяжение анкерных болтов Anchor bolts in tension	С учетом усилий от эффекта рычага* With prying forces* $k_{16} = \frac{1,6 \cdot A_s}{L_b},$	Без учета усилий от эффекта рычага* Without prying forces* $k_{16} = \frac{2,0 \cdot A_s}{L_b},$
	где A_s — площадь растянутого болта или стержня анкерного болта; L_b — длина деформирования болта, равная зажимной длине (суммарная толщина стягиваемых элементов и шайб) плюс полусумма высоты головки болта и гайки, или длина деформирования фундаментного болта, равная сумме восьми номинальных диаметров болта, толщины слоя стяжки (подливки), толщины опорной плиты, шайбы и половины высоты гайки where A_s — the tensile stress area of the bolt or of the anchor bolt; L_b — the bolt elongation length, taken equal to the grip length (total thickness of material and washers), plus half the sum of the height of the bolt head and the height of the nut or the anchor bolt elongation length, taken equal 10 the sum of 8 times the nominal bolt diameter, the grout layer, the plate thickness, the washer and half the height of the nut	

Примечание: * — усилия от эффекта рычага могут возникнуть, если $L_b \leq \frac{8,8 \cdot m^3 \cdot A_s}{l_{eff} \cdot t_p}$.
Note: * — prying forces may develop, if $L_b \leq \frac{8,8 \cdot m^3 \cdot A_s}{l_{eff} \cdot t_p}$.

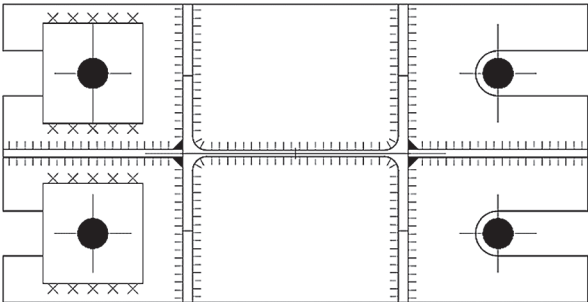


Рис. 8. Конструктивное решение базы колонны, принятой в расчете
Fig. 8. Design solution of the column base accepted in the calculation

ления и приведенных длин. Коэффициент приведения длины определяется по известной формуле:

$$\mu = \sqrt{\frac{N_e}{N_{cr,e}}},$$

где $N_e = \frac{\pi^2 E \cdot I_c}{L^2}$ — критическая сила Эйлера. Критическая сила в упругой стадии с учетом упругой заделки базы колонны $N_{cr,e}$ может быть определена расчетом на устойчивость рамы с применением программных комплексов, например RFEM, Lira и т.д.

На рис. 9 приведен график изменения коэффициента приведения длины μ в зависимости от отношения: $\frac{S_{inj} \cdot L_c}{E \cdot I_c}$, из которого следует, что при относительных жесткостях базы колонны до 25–30 зна-

Табл. 3. Оценка жесткости типовых баз колонн по шифру 8397 выпуск 2²
Table 3. Estimation of stiffness of typical column bases according to code 8397 issue 2²

Номер двутавра Number I-beam	Высота колонны L_c , м Column height L_c , м	Начальная вращательная жесткость базы $S_{j,ini}$, кН·м The initial rotational stiffness of base $S_{j,ini}$, кН·м	Погонная жесткость колонны $S_k = E \cdot J_c / L_c$, кН·м Linear stiffness of column $S_k = E \cdot J_c / L_c$, кН·м	Требуемый диаметр анкерных болтов, мм Required diameter of anchor bolts, mm		Коэффициент $k_b = \frac{S_{j,ini}}{S_j}$ Coefficient $k_b = \frac{S_{j,ini}}{S_j}$
				по шифру 8397 code 8397	по EN 1993-1-8 (при $k_{15} = \infty$) in EN 1993-1-8 (at $k_{15} = \infty$)	
35Ш1	6,0	121 056,8	6926,5	42	56	17,5
	7,2	222 179,6	5772,083	42	56	38,5
	8,4	214 918,3	4947,5	42	30	43,4
40Ш1	6,0	290 145,2	12 026	42	64	24,1
	7,2	283 096,3	10 021,67	42	48	28,2
	8,4	297 978,2	8390,233	48	48	35,5
	9,6	322 943,3	7516,25	48	36	43,0
50Ш1	6,0	434 805,1	21 325,5	48	90	20,4
	7,2	425 495,1	17 771,25	56	72	23,9
	8,4	489 683,7	15 232,5	56	56	32,1
	9,6	472 311,6	13 328,44	64	48	35,4
60Ш1	7,2	653 151,5	31 295,83	56	110	20,9
	8,4	669 772,6	26 825	56	80	25,0
	9,6	876 214,4	23 471,88	64	56	37,3
70Ш1	7,2	1 257 815,8	50 166,67	64	90	25,1
	8,4	1 259 699,3	43 000	64	72	29,3
	9,6	1 411 575,1	37 625	72	56	37,5

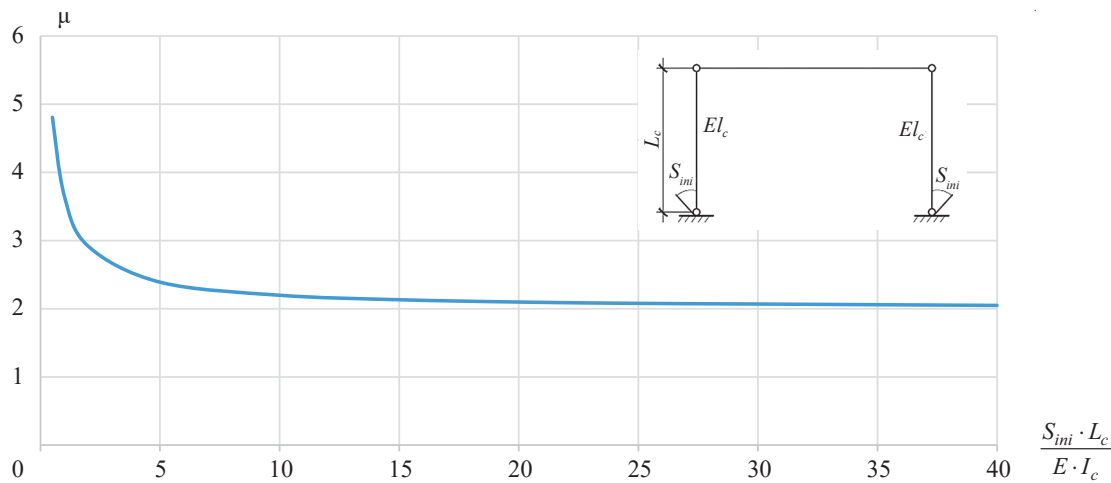


Рис. 9. График изменения коэффициента приведения длины колонн однопролетной рамы в зависимости от относительной жесткости базы
Fig. 9. Graph of change in the coefficient of conversion of column length of a single-span frame depending on the relative stiffness of the base

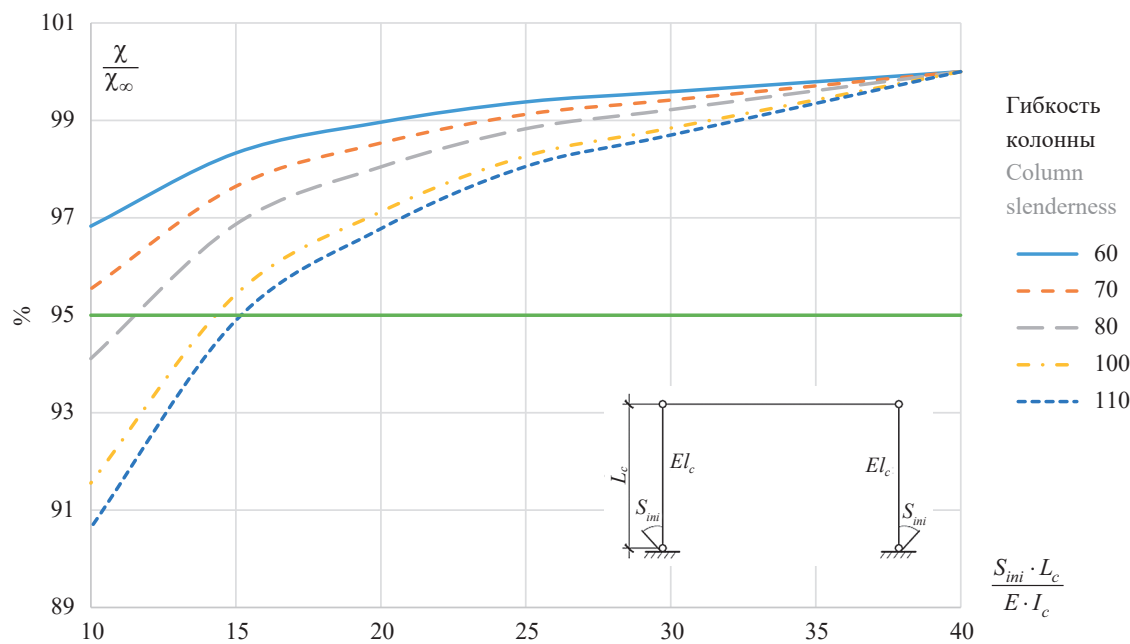


Рис. 10. График изменения коэффициента снижения прочности однопролетной рамы в зависимости от относительной жесткости базы и гибкости колонн
Fig. 10. Graph of change of the strength reduction factor of a single-span frame depending on the relative stiffness of the base and flexibility of the columns

чение коэффициента приведения практически равно значению при «жесткой» заделке опорных узлов рамы, т.е. $\mu = 2$.

При величине относительной жесткости $\frac{S_{ini} \cdot L_c}{E \cdot I_c} = 20$ коэффициент приведения длины колонны μ увеличится на 2,4 %, при величине относительной жесткости 15 увеличение коэффициента μ составит 4,05 %.

Коэффициент приведения длины оказывает влияние на значение коэффициента уменьшения расчетного сопротивления (прочности) стали. На рис. 10 показаны графики зависимости изменения коэффициента снижения прочности, вычисленного по EN 1993-1-1⁶ в зависимости от отношения $\frac{S_{ini} \cdot L_c}{E \cdot I_c}$ для различных гибкостей колонн.

Из рис. 9, 10 следует, что при больших гибкостях колонн понижающий коэффициент потери устойчивости χ падает быстрее. Уровень 5 % достигается при относительной вращательной жесткости базы колонны $\frac{S_{ini} \cdot L_c}{E \cdot I_c} = 15$ при гибкости колонны, равной $\lambda = 110$. Таким образом, значение коэффициента, позволяющего классифицировать базу колонны как жесткую, может быть уменьшено до 20, в ряде случаев до 15.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Выполнена оценка жесткости баз типовых внецентренно сжатых колонн, запроектированных по шифру 8397 «Стальные колонны из широкополочных двутавров и связи из гнутосварных профилей для одноэтажных зданий с покрытием типа “Молодечно”», выпуск 2².

Определено, что на жесткость баз колонн толщина плиты и класс прочности бетона фундамента влияют незначительно. Жесткость на 60 % зависит от марки (класса) стали и диаметра анкерных болтов и высоты колонны.

Поверочными расчетами установлено, что более 50 % типовых баз колонн по шифру 8397 «Стальные колонны из широкополочных двутавров и связи из гнутосварных профилей для одноэтажных зданий с покрытием типа “Молодечно”»² попадают в разряд полужестких, что в соответствии с п. 5.2.2.5 (1) EN 1993-1-8 недопустимо. На основании этого рекомендуется пересмотр конструктивных решений, принятых в типовых решениях, или критериев отнесения типа базы колонны к жесткой.

Значение коэффициента $k_b = 30$ при определении критерия отнесения типа базы колонны к жесткой в формуле $S_{j,ini} \geq k_b \cdot E \cdot J_b / L_b$ рекомендовано уменьшить до величины $k_b = 20$, в ряде случаев до 15, что будет соответствовать снижению несущей способности не более чем на 5 %.

⁶ ТКП EN 1993-1-1 (EN 1993-1-1:2005, EN 1993-1-1:2005/AC:2009, IDT). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–1. Общие правила и правила для зданий. 2020. 88 с.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шурин А.Б., Туснин А.Р., Зинкевич И.В., Мухин А.В. Проектирование стальных конструкций в соответствии с требованиями EUROCODES : учебное пособие. М. : АСВ, 2021. 222 с.
2. Шурин А.Б., Надольский В.В. Опыт применения Еврокодов при проектировании стальных конструкций в Республике Беларусь // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 5. С. 740–751. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.740-751. EDN JAVYTK.
3. Шурин А.Б., Мухин А.В. Опыт конструирования ферм из гнутосварных профилей в соответствии с требованиями EN 1993-1 // Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини: збірник наукових праць. 2020. № 24. С. 141–149.
4. Tushnina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 5 (73). С. 25–39. DOI: 10.18720/MCE.73.3. EDN ZNLKNH.
5. Ferdous W. Effect of beam-column joint stiffness on the design of beams // 23rd Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials. 2014. Pp. 701–706.
6. Bandyopadhyay M., Banik A. Numerical analysis of semi-rigid jointed steel frame using rotational springs // International Conference on Structural Engineering and Mechanics (ICSEM). 2013.
7. Туснина В.М., Платонова В.Д. Численный анализ жесткости фланцевых узлов «балка-колонна» // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 9. С. 28–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLJF.
8. Wald F., Gresnigt A.M., Weynand K., Jaspart J.P. Application of the Component Method to Column Bases // COST C1 Conference Liege 1998. 1999. Pp. 155–166.
9. Column Bases in Steel Building Frames / ed. K. Weynand. Brussels, 1999.
10. Wald F., Seifert J. The Column-Bases Stiffness Classification // Nordic Steel Colloquium. 1991. Pp. 309–316.
11. Bijlaard F., Steenhuis M. Prediction of the influence of connection behaviour on the strength, deformations and stability of frames, by classification of connections // Proceedings of the Second International Workshop on Connections in Steel Structures. 1992. Pp. 307–318.
12. Jaspart J.P., Wald F.A.E., Weynand K., Gresnigt N. Steel column base classification // HERON. 2008. Vol. 53. Issue 1/2. Pp. 69–86.
13. Ghosh U.K. Design of welded steel structures: principles and practice. Taylor & Francis, 2016. 244 p.
14. Degertekin S.O., Hayalioglu M.S. Design of non-linear semi-rigid steel frames with semi-rigid column bases // Electronic Journal of Structural Engineering. 2004. Vol. 4. Pp. 1–16. DOI: 10.56748/ejse.437
15. Алтамов В.Ю., Лукин А.О., Сахаров А.А. Исследования жесткости узла базы стальной колонны, состоящей из одной опорной плиты // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 9–14. EDN UKFKDV.
16. Fisher J.M., Kloiber L.A. Steel Design Guide 1. Base Plate and Anchor Rod Design. 2nd Edition. AISC, 2006. 62 p.
17. Wald F., Sokol Z. Column Base Stiffness Classification // Stability and Ductility of Steel Structures. 1997. Pp. 675–682.

Поступила в редакцию 13 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 18 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 20 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Андрей Брониславович Шурин — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных конструкций; Брестский государственный технический университет (БрГТУ); 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 6788-4872, Scopus: 57220833497, ORCID: 0000-0003-1396-3503; Shuryin@mail.ru;

Игорь Владимирович Зинкевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; Брестский государственный технический университет (БрГТУ); 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267, Республика Беларусь; ivzinkevich@mail.ru.

Вклад авторов:

Шурин А.Б. — написание раздела «Результаты исследования», построение рис. 1–6, табл. 1–3, формулирование выводов.

Зинкевич И.В. — расчет диаграмм на рис. 7, 8, корректировка табл. 3, формулирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Shuryin A.B., Tusnin A.R., Zinkevich I.V., Mukhin A.V. *Design of steel structures in accordance with EUROCODES requirements : tutorial*. Moscow, ASV, 2021; 222. (rus.).
2. Shuryin A.B., Nadolski V.V. Experience of implementation of Eurocodes in the design of steel structures in the Republic of Belarus. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):740-751. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.740-751. EDN JAVYTK. (rus.).
3. Shuryin A.B., Mukhin A.V. Experience in designing trusses from bent-welded profiles in accordance with the requirements of EN 1993-1. *Everyday structures from metal and wood : collection of scientific works*. 2020; 24:141-149. (rus.).
4. Tusnina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 5(73):25-39. DOI: 10.18720/MCE.73.3. EDN ZNLKNH.
5. Ferdous W. Effect of beam-column joint stiffness on the design of beams. *23rd Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*. 2014; 701-706.
6. Bandyopadhyay M., Banik A. Numerical analysis of semi-rigid jointed steel frame using rotational springs. *International Conference on Structural Engineering and Mechanics (ICSEM)*. 2013.
7. Tusnina V.M., Platonova V.D. Numerical analysis of the stiffness of the “beam-column” flange joints. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 9:28-33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLLJF. (rus.).
8. Wald F., Gresnigt A.M., Weynand K., Jaspart J.P. Application of the Component Method to Column Bases. *COST C1 Conference Liege 1998*. 1999; 155-166.
9. *Column Bases in Steel Building Frames* / ed. K. Weynand. Brussels, 1999.
10. Wald F., Seifert J. The Column-Bases Stiffness Classification. *Nordic Steel Colloquium*. 1991; 309-316.
11. Bijlaard F., Steenhuis M. Prediction of the influence of connection behaviour on the strength, deformations and stability of frames, by classification of connections. *Proceedings of the Second International Workshop on Connections in Steel Structures*. 1992; 307-318.
12. Jaspart J.P., Wald F.A.E., Weynand K., Gresnigt N. Steel column base classification. *HERON*. 2008; 53(1/2):69-86.
13. Ghosh U.K. *Design of welded steel structures: principles and practice*. Taylor & Francis, 2016; 244.
14. Degertekin S.O., Hayalioglu M.S. Design of non-linear semi-rigid steel frames with semi-rigid column bases. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2004; 4:1-16. DOI: 10.56748/ejse.437
15. Alpatov V.Yu., Lukin A.O., Saharov A.A. The study of rigidity of a steel column base assembly consisting of a support plate. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 9:9-14. EDN UKFKDV. (rus.).
16. Fisher J.M., Kloiber L.A. *Steel Design Guide 1. Base Plate and Anchor Rod Design. 2nd Edition*. AISC, 2006; 62.
17. Wald F., Sokol Z. Column Base Stiffness Classification. *Stability and Ductility of Steel Structures*. 1997; 675-682.

Received April 13, 2025.

Adopted in revised form on May 18, 2025.

Approved for publication on May 20, 2025.

B I O N O T E S: **Andrei B. Shuryin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Building Structures; **Brest State Technical University (BSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; ID RSCI: 6788-4872, Scopus: 57220833497, ORCID: 0000-0003-1396-3503; Shuryin@mail.ru;

Igor V. Zinkevich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures; **Brest State Technical University (BSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; ivzinkevich@mail.ru.

Contribution of the authors:

Andrei B. Shuryin — writing the section “research results”, constructing Fig. 1–6, Table 1–3, conclusions.

Igor V. Zinkevich — calculation of diagrams in Fig. 7, 8, correction of Table 3, conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.