

Г. СУНЬ¹, Л.И. МИРОНОВА¹, Ч. ЛЮ¹¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

ИЗГИБНАЯ ЖЕСТКОСТЬ БОЛТОВЫХ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БАЛКИ С КОЛОННОЙ

Аннотация. Болтовые фланцевые соединения чаще используются в качестве соединения балки с колонной и балок друг с другом, которые воспринимают момент. Учет разницы прочности фланца и прочности высокопрочных болтов, которая приведет к трем разным типам разрушенных механизма, следует изучать прочность и жесткость таких соединений компонентным методом. Наиболее важными параметрами в этом методе являются расчетная ширина несущих элементов на изгиб и коэффициент жесткости. Определение отношения прочности элементов соединения к механизму разрушения и расчет коэффициента жесткости, вычисленной на основе Т-образного элемента, представляют собой важную задачу. По этой причине целью данной статьи является разработка метода расчета изгибной жесткости и прочности болтовых фланцевых соединений в условиях монотонных нагрузок. Предложенный метод расчета основан на компонентный метод, строительную механику и сопротивление материалов. Верификация выполнена на сведения выполненных экспериментов, для которых можно получить практические зависимости между моментом и углом поворота. Практическая реализация предложенного метода продемонстрирована на расчет несущей способности и жесткости образца выполненных экспериментов. В качестве результатов выполненного исследования можно выделить собственно метод расчета жесткости болтовых фланцевых соединений балки с колонной, влияние прочности разных элементов таких соединений на механизм разрушения и рекомендацию по проектированию соединений в условиях монотонных нагрузок. С использованием разработанного метода можно точно оценить несущую способность и жесткости соединения, оформление диаграммы зависимости между моментом и углом поворота.

Ключевые слова: стальные конструкции, болтовые фланцевые соединения, жесткость, пластический шарнир, механизм разрушений.

G. SUN¹, L.I. MIRONOVA L.I.,¹ C. LIU¹¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin, city Yekaterinburg, Russia

BENDING RIGIDITY OF BOLT END-PLATE CONNECTIONS OF JOINT BEAM TO COLUMN

Abstract. The end-plate connections are most often used as a connection of beam to column and between beams that perceive a moment. Taking into account the difference in the strength of the end plate and the strength of high-strength bolts, which will lead to three different types of failure mechanisms, it is necessary to study the strength and stiffness of such joints using the component method. The most important parameters in this method are the calculated width of the bearing elements for bending and the stiffness coefficient. Determining the ratio of the strength of the connection elements to the failure mechanism and calculating the stiffness coefficient calculated on the basis of the T-shaped element is an important task. For this reason, the objective of this paper is to develop a method for calculating the bending stiffness and strength of the end-plate connections joints under monotonic loads. The proposed calculation method is based on the component method, structural mechanics and strength of materials. Verification is performed on the basis of the experiments performed, for which practical dependencies between the moment and the angle of rotation can be obtained. The practical implementation of the proposed method is demonstrated by calculating the bearing capacity and rigidity of the sample of the experiments performed.

As results of the study, it is possible to highlight the method for calculating the rigidity of the end-plate connections of beam to column, the influence of the strength of different elements of such connections on the mechanism of destruction and a recommendation for designing connections under monotonous loads. Using the developed method, it is possible to accurately estimate the bearing capacity and rigidity of the connection, design a diagram of the relationship between the moment and the angle of rotation.

Keywords: steel structures, end-plate connections, stiffness, plastic hinge, failure mechanisms.

Введение

Согласно национальному проекту «Жилье и городская среда» к 2030 г. в сегменте массового жилищного строительства должно возводиться 80 млн м² ежегодно [1]. Доля зданий в России на металлокаркасе сильно отстает от развитых стран [2]. Болтовые фланцевые соединения (ФС) часто используются, как соединение балки с колонной и балок друг с другом благодаря удобству монтажа и простоте контроля соединения.

Диаграмма зависимости между моментом и углом поворота ($M-\theta$) описывают всю совокупность свойств соединения – прочность, деформативность и изгибную жесткость.

На основе компонентного метода в Еврокоде-3 и метода конечных элементов разработана методика для оформления диаграммы зависимости $M-\theta$ и оценки работы ФС в условиях мало-циклических нагрузок [3]. Проанализирована работа фланца, как плиточный элемент, и распределение усилия в болтах с помощью численных расчетов, разработана методика для определения начальной изгибной жесткости ФС на сильной оси и на слабой оси двутавровой колонны и проверена точность созданной методики [4]. Разработан метод для оценки начальной изгибной жесткости ФС стальных каркасов при наличии ребер жесткости [5]. Проведен эксперимент стальных каркасов с ФС при сейсмических воздействиях и выполнена проверка точности предлагаемой методики оформления диаграммы зависимости $M-\theta$ [6].

В Еврокоде-3 представлены компонентный метод рассмотрения ФС как совокупности Т-образных элементов [7]. На основе Т-образного элемента можно разработать метод оформления диаграммы зависимости $M-\theta$, в которой важными параметрами являются начальная изгибная жесткость, несущая способность и предельный угол поворота [8].

Проведен эксперимент ФС балки с колонной и проанализирована работоспособность соединений с помощью Т-образного элемента [9]. Выполнено экспериментальное исследование ФС в условиях монотонных и циклических нагрузок и выявлено распределение пластического шарнира (ПШ) Т-образного элемента и представлены рекомендации по расчету ширины такого элемента [10, 11]. Выполнен эксперимент для изучения работы Т-образного элемента на растяжение и выявлено влияние типа сварного шва на его работоспособность [12, 13].

Исследована работа Т-образного элемента методом конечных элементов и контактное состояние между соединенными плиточными элементами и представлено, что учитывается дополнительное напряжение при расчете прочности болтов и расположение ПШ [14-17].

Разработана методика для оформления диаграммы зависимости $M-\theta$ при действии циклических нагрузок с использованием Т-образного элемента, проанализированы распределение усилия в болтах, деформации полки такого элемента и механизм разрушений и пластичность целого ФС [18]. Проведен численный расчет ФС в условиях циклических нагрузок на верхнем торце колонны и разработан метод расчета начальной изгибной жесткости на основании компонентного метода [19].

В вышесказанных работах отсутствуют исследования влияния прочности болтов и фланца на работоспособность Т-образного элемента и метод расчета изгибной жесткости ФС в стадии пластической деформации. Целью данной статьи является разработка методики для оценки начальной изгибной жесткости ФС в условиях монотонных нагрузок. При этом сделан акцент на анализ влияния прочности болтов и фланца на работу Т-образного элемента.

Модели и методы исследования

Рекомендации в нормативных документах разных стран отличаются друг от друга.

В Еврокоде-3 [20] использован Т-образный элемент на растяжение для проектирования ФС. Расчетная ширина Т-образного элемента определяется распределением ПШ. На основании этого элемента проведен расчет предельных нагрузок, которые воспринимают ФС, и проведена оценка начальной изгибной жесткости соединения.

В американской норме LRFD [21] представлены формулы для оценки прочности фланца, которые разделены на два типа на основе механизма разрушений Т-образного элемента. В норме AISC 358-16 [22] есть рекомендация по расчету рычажной силы и предельной растягивающей силы, воспринимаемой Т-образным элементом.

В СП 294.1325800.2017 [23] представлены 7 сочетаний толщины фланца и диаметра болтов, и также даны рекомендации по расчету усилия в болтах внутренней зоны и внешней зоны. В публикации [24] представлены 8 типов распределения ПШ Т-образного элемента.

Китайские нормы GB 51022-2017 [25] и JGJ 82-2011 [26] представляют чаще используемые документы для проектирования ФС. В норме [25] предлагается, что усилия в болтах распределяются пропорционально расстоянию от нейтральной оси, которая находится в геометрическом центре группы болтов, до болта и проверка прочности фланца в соответствии с разными опорами на кромке фланца. В норме [26] рекомендуется использовать Т-образный элемент в качестве механической модели для проверки надежности соединений.

Разные прочности фланца и болтов приводит к трем типам разрушений, таким, как сочетание: «сильный болт, слабый фланец», «одновременное разрушение болта и фланца» и «слабый болт, сильный фланец». При ситуации «сильный болт, слабый фланец» ФС обладает фланцем маленькой толщиной и болтами больших диаметров, а механический механизм расположен на корне полки Т-образного элемента и около отверстий под болт. При ситуации «одновременное разрушение болта и фланца» на полке Т-образного элемента появится рычажная сила, которая расположена у свободной кромки фланцев. При ситуации «слабый болт, сильный фланец» ФС обладает фланцем большой толщины, который деформируется жестко при отсутствии локальной деформации, что позволяет игнорировать рычажную силу.

Фланец и полки колонны соединены с помощью высокопрочных болтов, поэтому расположение болтов и распределение усилий в болтах влияет на начальную изгибную жесткость узла балки с колонной.

Основные гипотезы, принятые при оформлении расчетной схемы, следующие.

1. Равномерное распределение усилий в болтах.
2. Рассмотрение ФС в условиях изгибающих моментов и отсутствии других типов нагрузки.
3. Профиль соединенной балки является абсолютно жестким.
4. Вращательная ось находится в геометрическом центре групп болтов и ее положение не изменено.

ФС, воспринимающее изгибающий момент, разделено на зону растяжения и зону сжатия. В зоне ФС на растяжение угол поворота состоит из деформации болтов на растяжение, стенки колонны на растяжение, полки колонны на изгиб и фланца на изгиб, а в зоне на сжатие – стенки колонны на сжатие, полки колонны на изгиб и фланца на изгиб. В зоне на сжатие нет деформации болтов на растяжение. Начальная изгибная жесткость K_y определяется по формулам (1)-(3)

$$K_{y,t} = \frac{K_{y,t} + K_{y,c}}{2}. \quad (1)$$

$$K_{y,t} = \frac{M}{\theta_{bo} + \theta_{w,t} + \theta_f + \theta_c} = \frac{M}{\frac{M}{E_y h_t^2 k_{bo}} + \frac{M}{E_y h_t^2 k_{w,t}} + \frac{M}{E_y h_t^2 k_f} + \frac{M}{E_y h_t^2 k_c}} = \frac{E_y h_t^2}{\frac{1}{k_{bo}} + \frac{1}{k_{w,t}} + \frac{1}{k_f} + \frac{1}{k_c}} = h_t^2 k_{eq}. \quad (2)$$

$$K_{y,c} = \frac{M}{\theta_{w,c} + \theta_f + \theta_c}. \quad (3)$$

где $K_{y,t}$ – начальная изгибная жесткость зоны на растяжение;
 $K_{y,c}$ – начальная изгибная жесткость зоны на сжатие;
 M – действующий изгибающий момент;
 E_y – модуль упругости стали;
 θ_{bo} – угол поворота от деформации болтов на растяжение;
 $\theta_{w,t}$ – угол поворота от деформации стенки колонны на растяжение;
 $\theta_{w,c}$ – угол поворота от деформации стенки колонны на сжатие;
 θ_f – угол поворота от деформации фланца на изгиб;
 θ_c – угол поворота от деформации полки колонны на изгиб;
 k_{bo} – коэффициент изгибной жесткости от болтов;
 $k_{w,t}$ – коэффициент изгибной жесткости от стенки колонны на растяжение;
 k_f – коэффициент изгибной жесткости от фланца;
 k_c – коэффициент изгибной жесткости от полки колонны;
 h_t – расстояние от вращательной оси до геометрического центра полки балки;
 k_{eq} – расчетный коэффициент жесткости.

Формула (4) принята для определения расчетного коэффициента жесткости

$$k_{eq} = \frac{\sum k_{eq,i} h_i}{h_{eq}}. \quad (4)$$

где $k_{eq,i}$ – расчетный коэффициент жесткости на i -й паре болтов;
 h_i – расстояние от нейтральной оси до центральной оси болта;
 h_{eq} – эквивалентная высота зоны ФС на растяжение или зоны на сжатие,
 $h_{eq} = \frac{\sum k_{eq,i} h_i^2}{\sum k_{eq,i} h_i}.$

На рис. 1 показана расчетная схема при общем повороте ФС.

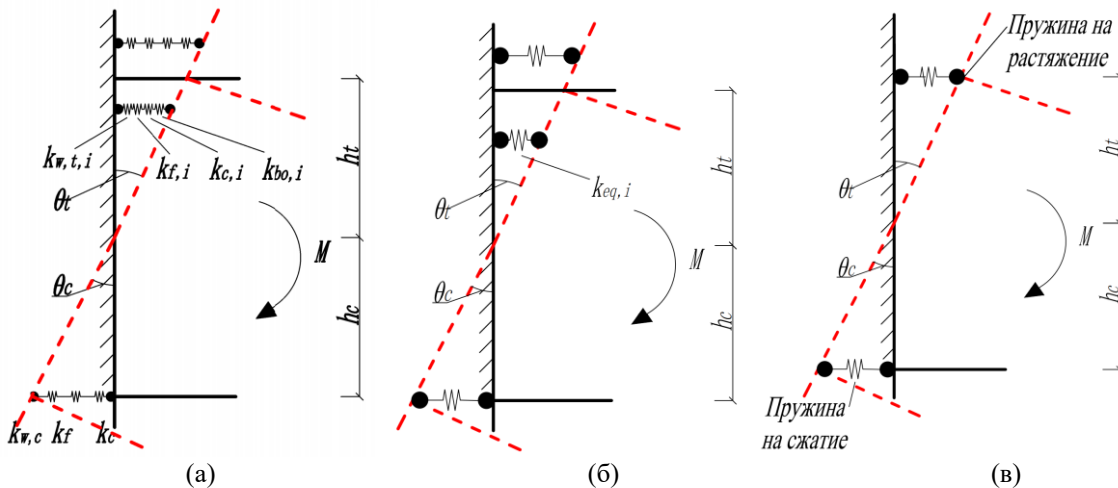


Рисунок 1 – Расчетная схема ФС с 8 болтами: а) отдельная жесткость каждого элемента, б) эквивалентная жесткость на каждой паре болтов, в) эквивалентная жесткость в зоне на растяжении и в зоне на сжатие

Принят Т-образный элемент для расчета коэффициента жесткости. На рис. 2 показано разделение ФС на несколько Т-образных элементов.

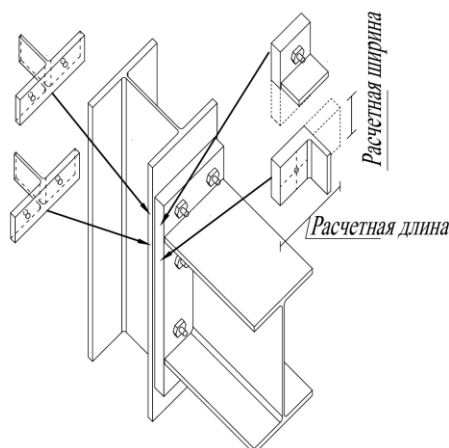


Рисунок 2 – Разделение ФС на Т-образные элементы

Принята формула (5) для расчета коэффициента жесткости болтов на растяжение

$$k_{bo} = \frac{ME_y h_t^2}{E_y h_t^2 \theta_{bo}} = \frac{M}{E_y h_t^2 \tan \theta_{bo}} = \frac{2 \sum_i F_{T,i} A_{bo}}{F_{T,i} l_{bo}}. \quad (5)$$

где l_{bo} – расчетная длина болтов;

Δl – удлинение болтов на растяжение;

$F_{T,i}$ – растягивающая сила в Т-образном элементе, которая воспринимается i парой болтов в зоне на растяжение ФС, на основе распределения усилий в болтах;

A_{bo} – расчетная площадь стержней болтов.

Формула (6) используется для определения коэффициента жесткости стенки колонны на растяжение

$$k_{w,t} = \frac{2 \sum_i F_{T,i} A_{w,t}}{F_{T,i} d_c}. \quad (6)$$

где d_c – эффективная высота стенки колонны;

$A_{w,t}$ – расчетная площадь сечения стенки колонны на растяжение, $A_{w,t} = t_w \cdot l_{w,t}$, t_w – толщина стенки колонны, $l_{w,t}$ – расчетная ширина стенки колонны на растяжение, которые показаны на рис.3.

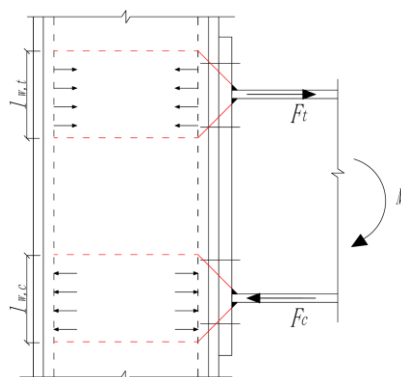


Рисунок 3 – Расчетная ширина стенки колонны на растяжение и на сжатие

Отличие опорных условий фланца на верхней зоне и на внешней зоне следует проанализировать отдельно.

При расчете жесткости фланца внешней зоны с учетом развития пластических деформаций различают три возможных механизма разрушения, в том числе развитие

глубоких пластических деформаций во фланце, разрыв болтов с частичным развитием пластических деформаций во фланце и разрыв болтов.

Если болты обладают значительной жесткостью, в полке Т-образного элемента развиты глубокие пластические деформации. В этом случае использование Т-образного элемента следует выполнять расчет деформации полки колонны при отсутствии утолщения и деформации фланца. Необходимо учитывать влияние предварительного натяжения высокопрочных болтов. Предварительное натяжение болтов ограничивает деформацию полки Т-образной модели на центральной оси, где расположены болты. На рис. 4. показана расчетная схема Т-образного элемента с болтами значительной жесткости. В соответствии с расчетной схемой расчетный пролет – расстояние между болтами.

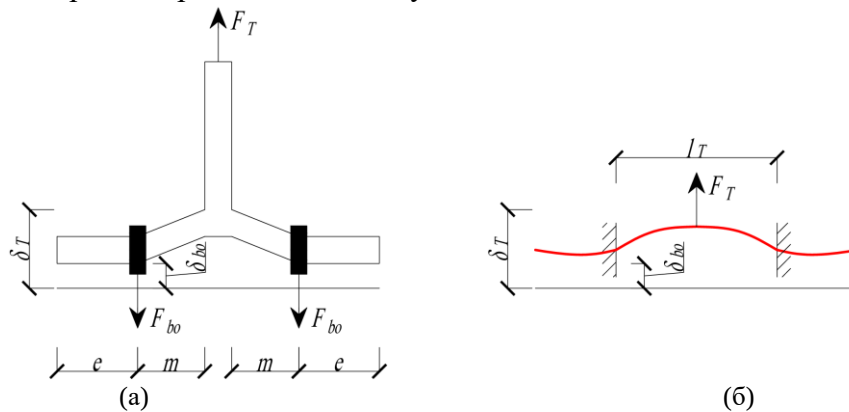


Рисунок 4 – Расчетная схема Т-образного элемента с болтами значительной жесткости:

а) распределение усилий в Т-образном элементе, б) расчетная схема:

e – расстояние от кромки полки до центральной оси болта, m – расстояние от корня полки до центральной оси болта

В этом случае не учитывается влияние шайбы и гайки болтов на деформацию Т-образного элемента, поэтому деформация стержней болтов является перемещением жесткой заделки в представленной расчетной схеме. Перемещение в половинном масштабе Т-образного элемента определено по формуле (7)

$$\delta_T = \frac{F_T m^3}{12 E_y I_T} + \delta_{bo}. \quad (7)$$

где δ_T – перемещение Т-образного элемента при действии нагрузки F_T ;

δ_{bo} – удлинение болтов;

I_T – момент инерции поперечного сечения Т-образного элемента, при расчете полки колонны, $I_T = I_c$, I_c является моментом инерции полки колонны, при расчете фланца, $I_T = I_f$, I_f является моментом инерции фланца.

С применением метода предельного равновесия удлинение болтов составляет деформацию фланца на сжатие от предварительного натяжения. Отношение площади фланца на сжатие от предварительного натяжения к расчетной площади стержней болтов составляет 10. Расчет удлинения болтов выполнен по формуле (8)

$$\delta_{bo} = \frac{(F_{T,i}/2) l_{bo}}{11 E_y A_{bo}}. \quad (8)$$

Итак, коэффициент жесткости Т-образного k_T в этом случае $k_{T,1}$ элемента определен по формуле (9)

$$k_{T,1} = \frac{F_{T,i}}{\delta_T E_y} = \frac{1}{\frac{m^3}{12 I_T} + \frac{l_{bo}}{22 A_{bo}}}. \quad (9)$$

В случае увеличения изгибной жесткости фланца, разрушение ФС происходит вследствие разрыва болтов при частичном развитии пластических деформации во фланце. На рис. 6 показана расчетная схема Т-образного элемента при этой ситуации. Шарнир находится на двух краях полки Т-образного элемента. Перемещение Т-образного элемента определено по формуле (10)

$$\delta_T = \frac{F_{T,i} l_T^3}{2 \cdot 48 E_y I_T} [F_{T,i}/2 - F_{bo}(3\alpha_T - 4\alpha_T^3)]. \quad (10)$$

где F_{bo} – усилие в болтах, $F_{bo} = F_{T,i}/2$;

l_T – расчетный пролет, $l_T = 2(e + m)$;

α_T – отношение e к расчетному пролету, $\alpha_T = e/l_T$.

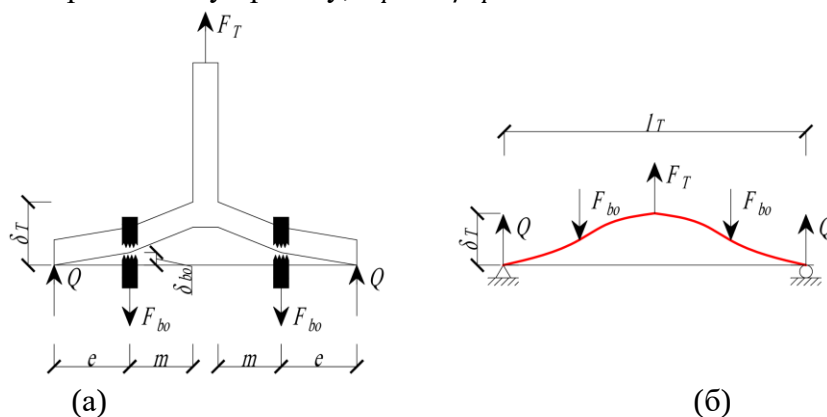


Рисунок 4 – Расчетная схема Т-образного элемента: а) распределение усилий в Т-образном элементе, б) расчетная схема:
 Q – рычажная сила

Необходимо проанализировать отношение между F_{bo} , F_T и Q . Выполнено исследование работы болтов ФС с учетом рычажной силы и представлены рекомендации по определению ее величины [27, 28]. Представлена следующая предпосылка. Удлинение болтов δ_{bo} составляет сумму перемещения полки колонны δ_c и перемещения фланца δ_f . Перемещение фланца на соответствующей паре болтов определено по формуле (11)

$$\delta_f = \frac{F_{T,i} l_T^3}{24 E_y I_f} [1 - \frac{q}{a+q}]. \quad (11)$$

где q – коэффициент, $q = \frac{l_T^3}{24} (3\alpha_T - 4\alpha_T^3)$;

a – коэффициент, $a = \frac{l_{bo}}{(\frac{1}{I_f} + \frac{1}{I_c}) A_{bo}}$.

Коэффициент жесткости Т-образной модели в данном случае $k_{T,2}$ определяется по формуле (12)

$$k_{T,2} = \frac{F_{T,i}}{\delta_T E_y}. \quad (12)$$

Если принять для фланца значительную изгибную жесткость, разрушение ФС происходит при разрыве болта. На рис. 5 показана расчетная схема. В этом случае не учитывается рычажная сила благодаря жесткому деформированию фланца. Прочность болтов контролирует механизм разрушения Т-образного элемента, поэтому перемещение элемента составляет удлинение болтов. Коэффициент Т-образного элемента $k_{T,3}$ определено по формуле (13)

$$k_{T,3} = k_{bo} = \frac{2 \sum_i F_{T,i} l_{bo}}{F_{T,i} A_{bo}}. \quad (13)$$

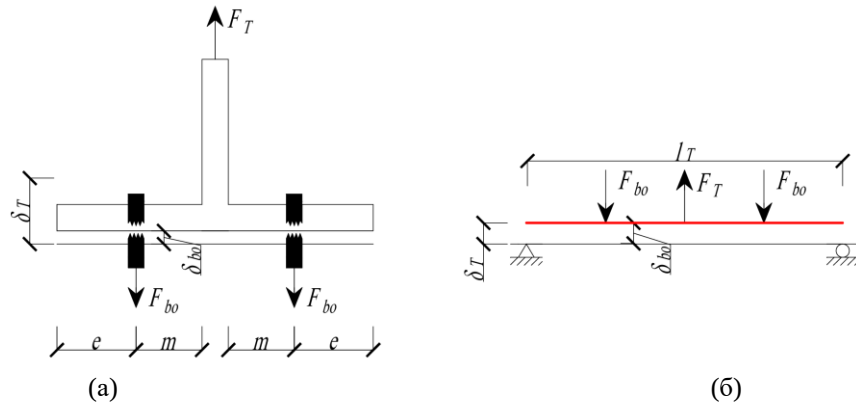


Рисунок 5 – Расчетная схема Т-образного элемента с полкой значительной изгибной жесткости: а) распределение усилий в Т-образном элементе, б) расчетная схема

Использован метод наложения жесткости для оценки деформации фланца внутренней зоны [29]. На рис. 6 показана расчетная схема. Стенка балки и полка балки работают, как жесткая заделка для внутренней зоны фланца.

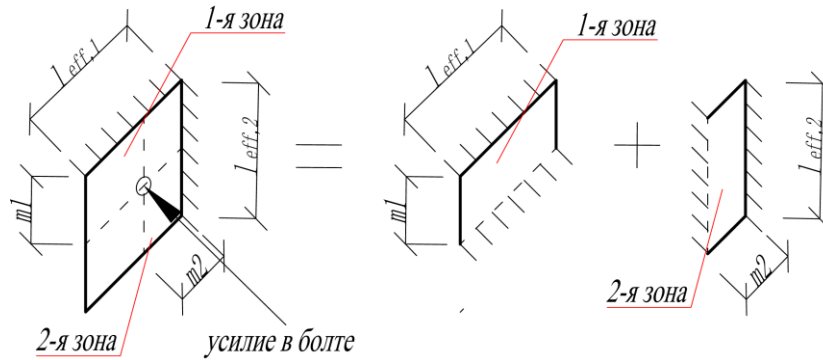


Рисунок 6 – Расчетная схема фланца внутренней зоны:
 $l_{eff,i}$ – расчетная ширина внутренней зоны

Следует предположить, что стержень болтов работает также, как жесткая заделка, потому что предварительное натяжение создает крепкое соединение полки колонны с фланцем. Изгибная жесткость внутренней зоны фланца $k_{f,b}$ определена по формуле (14)

$$k_{f,b} = k_{f,b,1} + k_{f,b,2}. \quad (14)$$

где $k_{f,b,1}$, $k_{f,b,2}$ – коэффициенты жесткости 1-й и 2-й внутренней зоны фланца.

Перемещение и коэффициент жесткости фланца внутренней зоны определяется по формулам (15)-(17)

$$\delta_1 = \frac{F_{T,i} m_1^3}{12 E_y I_1}. \quad (15)$$

$$\delta_2 = \frac{F_{T,i} m_2^3}{12 E_y I_2}. \quad (16)$$

$$k_{f,b} = 12 \left(\frac{I_1}{m_1^3} + \frac{I_2}{m_2^3} \right). \quad (17)$$

где I_1 , I_2 – моменты инерции сечений 1-й и 2-й внутренней зоны фланца.

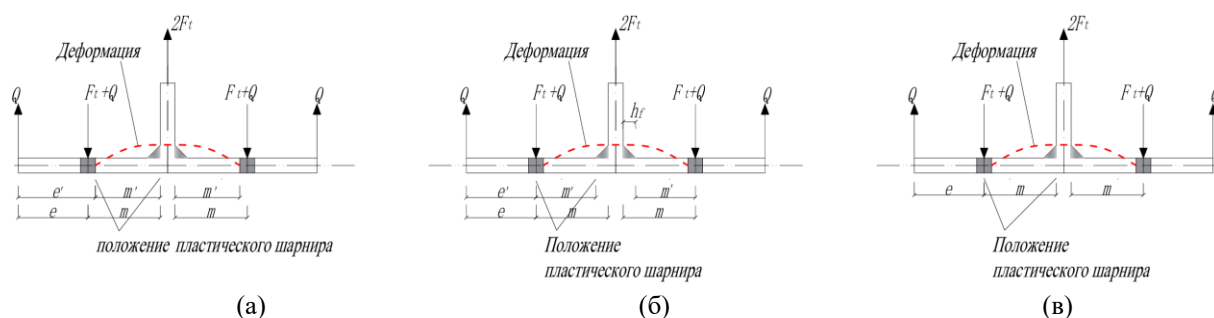


Рисунок 7 – Развитие пластического шарнира в Т-образном элементе: а) предлагаемое расположение пластического шарнира из публикации [30], б) в Еврокоде-3 [20] и в СП 294.1325800.2017 [23], в) в норме JGJ 82-2011 [26]

m – расчетная ширина пластического шарнира, e – расчетное расстояние от кромки Т-образного элемента до места пластического шарнира

На рис.7 показаны три варианта развития пластического шарнира. Различие в расчетной ширине ПШ приводит к разным расчетным результатам по рекомендациям в нормах. Величина m влияет на расчетное значение рычажной силы, несущей способности общего соединения. В китайской норме JGJ 82-2011 [26] расчетная ширина ПШ составляет расстояние от корня Т-образного элемента до оси болта. В американской норме [30] рекомендуют в качестве расчетной ширины ПШ принимать минимальное значение между $3,5e$ и расстоянием от корня Т-образного элемента до отверстия под болт. В Еврокоде-3 [20] для оценки несущей способности ФС за ширину ПШ принимают расстояние от корня сварного шва до оси болта. В российской норме отсутствуют такие рекомендации о ПШ Т-образного элемента, но в таблице 2.1 серии 2.440-2 выпуска 7 [31] есть рекомендация по определению предельного изгибающего момента по нагруженным болтам.

На основании разработанной методики для оценки изгибающего момента можно сделать вывод, что расчетная начальная изгибная жесткость увеличивается при уменьшении расчетной ширины ПШ. Уменьшение расчетного плеча усилия в болтах ведет к уменьшению толщины фланца и деформации болтов. В данной работе в качестве расчетной ширины ПШ с учетом влияния отверстия под болт на ослабление сечения полки Т-образного элемента рекомендуется принять $m = m - 0,8d_o$ (где d_o – диаметр отверстий под болт).

Результаты исследования и их анализ

Верификация точности разработанной методики выполняется в ходе проведения численных экспериментов. В качестве проверенных объектов приняты образцы *D*, *E* из работы [32], образец *JS4* из работы [33], образцы *SC2*, *SC4*, *SC8* из работы [34], образцы *ST*, *A1*, *A2*, *B1* и *B2* из работы [35], образец *SEP1.00* из работы [36]. В таблице 1 представлены расчетные результаты. При расчете в качестве расчетной ширины внешней зоны ФС принято $\frac{b}{2}$ (где b – ширина фланца).

Таблица 1 – Расчетные результаты по разработанной методике

Образец	$K_{y,e}$, kN·m/rad	Механизм разрушения	$K_{y,1}$	$\frac{K_{y,1}}{K_{y,e}}$	$K_{y,2}$	$\frac{K_{y,2}}{K_{y,e}}$	$K_{y,3}$	$\frac{K_{y,3}}{K_{y,e}}$	$K_{y,4}$	$\frac{K_{y,4}}{K_{y,e}}$
<i>D</i>	16600	П	8261	0,50	17671	1,06	14537	0,88	14913	0,90
<i>E</i>	17500	П	10882	0,62	19857	1,13	18702	1,07	17420	1,00
<i>JS4</i>	10924	П	4812	0,44	11764	1,08	11525	1,06	10019	0,92
<i>SC2</i>	52276	Б	41861	0,80	58788	1,12	55758	1,07	50871	0,97
<i>SC4</i>	51535	Ф	28430	0,55	51150	0,99	48306	0,94	45127	0,88

Продолжение таблицы 1

SC8	41634	Ф, Б	23284	0,56	44184	1,06	41407	0,99	38354	0,92
ST	10571	Ф	6510	0,62	11284	1,07	11867	1,12	9927	0,94
A1	9784	Ф	5912	0,60	10661	1,09	11205	1,15	9199	0,94
A2	9538	Ф	7038	0,74	11866	1,24	12483	1,31	10454	1,10
B1	10471	Ф	7083	0,68	12378	1,18	12978	1,24	10616	1,01
B2	10282	Ф	6221	0,61	10798	1,05	11393	1,11	9602	0,93
SEP1.00	10100	К	4652	0,46	10496	1,04	7793	0,77	8753	0,87
Среднее назначение			-	0,60	-	1,09	-	1,06	-	0,95

Примечание:

Ф – развитие ПШ во фланце и разрушение сварного шва, который прикрепляет балку к фланцу;

Б – разрыв болтов;

П – развитие ПШ в полке балки;

К – развитие ПШ в полке колонны;

$K_{y,e}$ – начальная изгибная жесткость образцов экспериментов;

$K_{y,1}$ – расчетная изгибная жесткость на основе рекомендации по положению ПШ в китайской норме; $K_{y,2}$ – расчетная жесткость в соответствии с американской нормой;

$K_{y,3}$ – расчетная жесткость в соответствии с Еврокодом-3 и российской нормой;

$K_{y,4}$ – расчетная жесткость в соответствии с шириной ПШ, которая составляет $m' = m - 0.8d_o$.

Согласно сведениям, приведенным в таблице 1, следует, что разработанная методика оценки начальной изгибной жесткости с $m' = m - 0.8d_o$ обладает высокой точностью и надежностью по сравнению с расчетными результатами на основании рекомендации по положению ПШ в разных нормативных документах. Результаты показывают, что с уменьшением величины m' и расчетной ширины Т-образного элемента изгибная жесткость уменьшается.

В СП 294.1325800.2017 [23] представлены 7 сочетаний диаметра болтов и толщины фланца, в том числе болты М24 и М27, фланец толщиной 20мм, 25мм, 30мм и 40мм. На рис.8 и рис.9 показана зависимость толщины фланца t_f от начальной жесткости ФС, полученной по разработанной методике. На рис.8 принята балка и колонна образца Е из таблицы 1 в качестве соединенных элементов, а на рис.9 – зависимость t_f от жесткости соединения балки 40Б2 с колонной 35К2.

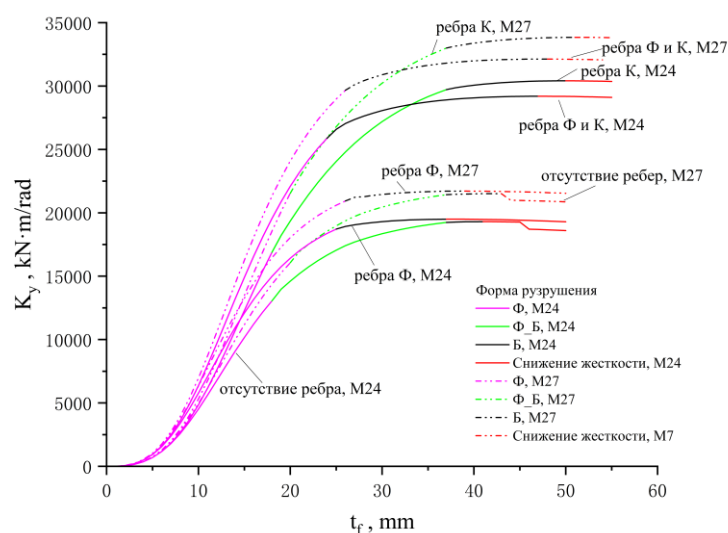


Рисунок 8 – Зависимость толщины фланца от начальной изгибной жесткости четырех разных видов ФС с болтами М24 или с болтами М27 балки с колонной образца Е в таблице 1, в том числе отсутствие ребер, наличие ребер фланца (Ф), наличие ребер колонны (К) и наличие двух типов ребер

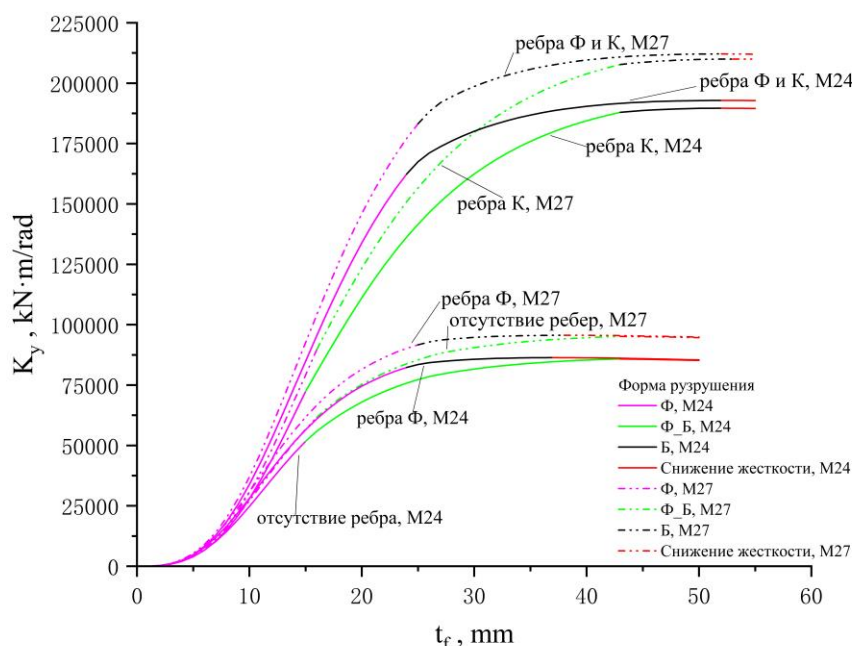


Рисунок 9 – Зависимость толщины фланца от начальной изгибной жесткости четырех разных видов ФС с болтами M24 или с болтами M27 балки 40Б2 с колонной 35К2, в том числе отсутствие ребер, наличие ребер фланца (Ф), наличие ребер колонны (К) и наличие двух типов ребер

На рис.8 видно, что развитие зависимости t_f от жесткости ФС с разными болтами аналогичны друг другу. При наличии ребер фланца и отсутствии ребер колонны жесткость по величине больше жесткости ФС при отсутствии ребер в случае полностью развития ПШ во фланце и в случае частично развития ПШ во фланце и разрыве болтов одновременно. Установка ребер жесткости колонны ведет к значительному повышению жесткости по сравнению с ФС при отсутствии ребер. Использование болтов с большим диаметром также позволяет повысить жесткость. Наличие ребер или изменение диаметра болтов влияет на механизм разрушения несущественно.

Ребро жесткости колонны работает более эффективно при наличии колонны с большим размером, потому что усиленная площадь участка стенки колонны также становится больше. В этих узлах балки с колонной ПШ в Т-образном элементе полностью развивается при использовании болтов M24 и фланце толщиной 20мм. ПШ в Т-образном элементе частично развивается и болты разрушаются с использованием болтов M24, M27 и фланце толщиной 25мм, и также в случае использования болтов M24, M27 и фланце толщиной 30мм при отсутствии ребер фланца. В остальных ситуациях ($d_{bo} = 24, 27mm$ и $t_f = 30, 40mm$) болты контролируют прочность ФС.

Выводы

В данной статье проанализирована начальная изгибная жесткость ФС, разработана методика для оценки жесткости на основании компонентного метода в Еврокоде-3 с использованием Т-образного элемента, также выявлено влияние положения пластического шарнира на расчетный результат. Можно сделать следующие выводы:

1. В разных нормативных документах предпосылки расчета ФС отличны друг от друга по положению пластического шарнира в Т-образном элементе;

2. Разработанные методики обладают высокой точностью и запасом жесткости и среднее значение $\frac{K_{y,4}}{K_{y,e}}$ составляет 0,95, поэтому предложено в качестве ширины пластического шарнира принять расстояние от края отверстия под болт до корня полки Т-образного элемента и для расчета используется $m' = m - 0.8d_o$;
3. Наличие ребер жесткости и увеличение диаметра болтов позволяет повысить жесткость ФС и установка ребер жесткости колонны позволяет значительно повысить жесткость узла балки с колонной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

32. Данилов А.Н. Развитие отрасли стального строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2021. №10. С.4-8.
33. Сон М.П., Землянухин А.Д. Моделирование фланцевого соединения в расчетном комплексе Ansys // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. №1(2). С. 73-79.
34. Jayarajan P. Characterization of connections in the seismic assessment of steel moment resisting frames // Journal of Structural Engineering. 2022. №4 (49). С. 306-317.
35. Qin J., Pan J., Wang Z., Wang P., Chen S. Initial rotational stiffness of end-plate connections based on the theory of plates and shells // Journal of Building Engineering. 2021. (41). С. 1-11.
36. Zhang W., Huang Z., Lai C., Lin H. Calculation of Initial Rotational Stiffness for Stiffened Extended End Plate Connection of Portal Frame // Journal of Architecture and Civil Engineering. 2011. №3 (28). С. 113-118.
37. Lu S., Wang Z., Pan J., Wang P. The Seismic Performance Analysis of Semi-rigid Spatial Steel Frames Based on Moment-Rotation Curves of End-plate Connection // Structures. 2022. (36). С. 1032-1049.
38. Перельмутер А.В., Крикунов Э.З., Юриченко В.В. Проектирование болтовых фланцевых соединений согласно Eurocode и украинским нормам: согласованность и противоречия // Металлические конструкции. 2010. №2(16). С.93-104.
39. Shi Y., Shi G., Wang Y. A simplified calculation method for moment-rotation curve of semi-rigid end-plate connections // China Civil Engineering Journal. 2006. №3(39). С. 19-23.
40. Сон. М.П. Фланцевые соединения в строительных конструкциях // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2018. №1 (29). С. 125-136.
41. Ozkılıç Y.O., Topkaya C. Extended end-plate connections for replaceable shear links // Engineering Structures. 2021. (240). С. 1-19.
42. Ozkılıç Y.O. Cyclic and monotonic performance of stiffened extended end-plate connections with large-sized bolts and thin end-plates // Bulletin of Earthquake Engineering. 2022. (20). С. 7441-7475.
43. Forfria J.J.J.C., Amador A.M.G., Gonzalez A.Q., Fernandez L.P. Investigating the T-stub connection with different web-to-flange joint configurations // Engineering Structures. 2023. (294). С. 1-17.
44. Francavilla A.B., Latour M., Tan P.J., Rizzano G. Ultimate behaviour of bolted beam-to-column connections in large rotations // Proceedings in civil engineering. 2023. (208). С. 2201-2205.
45. Семенов А.А., Маляренко А.А., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н. Напряженно-деформированное состояние высокопрочных болтов фланцевых соединений в крупнительных стыках стропильных ферм // Инженерно-строительный журнал. 2014. №5. С. 54-62.
46. Шафрай К.А., Шафрай С.Д. Прочность сварных швов фланцевых соединений стальных конструкций // Известия вузов. Строительство. 2018. №8. С. 36-47.
47. Шафрай К.А., Шафрай С.Д. Особенность работы фланцевых соединений строительных конструкций. Контактные напряжения и рычажные силы // Известия вузов. Строительство. 2013. №11. С. 89-96.
48. Ozkılıç Y.O., Topkaya C. The plastic and the ultimate resistance of four-bolt extended end-plate connections // Journal of Constructional Steel Research. 2021. (181). С. 1-19.
49. Hu J.W., Leon R.T., Park T., Mechanical modeling of bolted T-stub connections under cyclic loads Part I: Stiffness modeling // Journal of Constructional Steel Research. 2011. (67). С. 1710-1718.
50. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection // Materials. 2020. №13 (22). С. 1-30.
51. EN 1993-1-8(2005); Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints.
52. AISC Manual of steel construction: Load& Resistance Factor Design, Second Edition, LRFD, 2 nd Edition (Volume 2: Connections).
53. ANSI/AISC 358-16. Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications.
54. СП 294.1325800.2017 Стальные конструкции. Правила проектирования.
55. СТО АРСС 11251254.001-021.01 Руководство по проектированию стальных конструкций многоэтажных зданий (Часть 2. Узлы) (в развитие СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции»).
56. GB 51022-2015 Technical code for steel structure of light-weight building with gabled frames.
57. JGJ 82-2011 Technical specification for high strength bolt connections of steel structures.

58. Liu X., Zeng M., Wang Y. Research on design methods of high strength bolt T-stub tensile connections // *Progress in Steel Building Structures*. – 2023. – № 2(25). – С. 23-31.
59. Zhang S., Chai C. Discussion on Calculation of Tensile Bearing Capacity and Prying Force in End Plate Joints // *Steel Structures*. – 2022. – № 5(37). – С. 44-50.
60. Shi G., Shi Y., Wang Y. Calculation method on moment-rotation curves of beam-to-column semirigid end-plate connections // *Engineering Mechanics*. – 2006. – № 5(23). – С. 67-73.
61. AISC. *Steel Construction Manual*. 16th Ed.
62. Серия 2.440-2 Узлы стальных конструкций зданий промышленных предприятий. Выпуск 7 Болтовые фланцевые рамные соединения балок с колоннами стальных каркасов зданий и сооружений.
63. Guo B., Gu Q., Liu F. и Zhao K. Experimental Research on Hysteretic Behavior of End-plate Beam-column connections // *Journal of Building Structures*. – 2002. – № 3(22). – С. 8-13.
64. Guo B., Wang L., Wang Y., Shi Y., Tian H. Experimental study on rotational stiffness of steel frame beam-column connections // *Journal of Building Structures*. – 2011. – № 10(32). – С. 82-89.
65. Shi G., Shi Y., Wang Y., Li S., Chen H. Experimental study of semirigid end-plate connections in multi-story steel frames // *Journal Tsinghua University (Sci & Tech)*. – 2004. – № 3(44). – С. 391-394.
66. Qin J., Pan J., Wang Z., Wang P., Chen S. Initial rotational stiffness of end-plate connections based on the theory of plates and shells // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – (41). – С. 1-11.
67. Abidelah A., Bouchair A., Kerdal D.E. Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2012. – (76). – С. 13-27.

REFERENCES

1. Danilov A.N. Steel construction development // *Industrial and Civil engineering*. 2021. No.10. Pp.4-8. (rus)
2. Son M.P., Zemlyanukhin A.D. Modeling of the flange connection in the settlement complex Ansys // *Modern Technologies in construction. Theory and Practice*. 2018. Vol. 2. No. 1. Pp.73-79. (rus)
3. Jayarajan P. Characterization of connections in the seismic assessment of steel moment resisting frames // *Journal of Structural Engineering*. 2022. Vol. 49. No. 4. Pp. 306-317.
4. Qin J., Pan J., Wang Z., Wang P., Chen S. Initial rotational stiffness of end-plate connections based on the theory of plates and shells // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 41. Pp. 1-11.
5. Zhang W., Huang Z., Lai C., Lin H. Calculation of Initial Rotational Stiffness for Stiffened Extended End Plate Connection of Portal Frame // *Journal of Architecture and Civil Engineering*. 2011. Vol. 28. No. 3. Pp. 113-118.
6. Lu S., Wang Z., Pan J., Wang P. The Seismic Performance Analysis of Semi-rigid Spatial Steel Frames Based on Moment-Rotation Curves of End-plate Connection // *Structures*. 2022. Vol. 36. Pp. 1032-1049.
7. Perel'muter A.V., Kriskunov E.Z., Yurchenko V.V. Design of flange bolt connections according to the Eurocode and Ukrainian codes: coordination and contradictions // *Metal Constructions*. 2010. Vol. 16. No.2. Pp.93-104. (rus)
8. Shi Y., Shi G., Wang Y. A simplified calculation method for moment-rotation curve of semi-rigid end-plate connections // *China Civil Engineering Journal*. 2006. Vol. 39. No. 3. Pp. 19-23.
9. Son M.P. Flange connections in building constructions // *PNRPU. Applied ecology. Urban development*. 2018. Vol. 29. No. 1. Pp. 125-136. (rus)
10. Ozkılıç Y.O., Topkaya C. Extended end-plate connections for replaceable shear links // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 240. Pp. 1-19.
11. Ozkılıç Y.O. Cyclic and monotonic performance of stiffened extended end-plate connections with large-sized bolts and thin end-plates // *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2022. Vol. 20. Pp. 7441-7475.
12. Forfria J.J.J.C., Amador A.M.G., Gonzalez A.Q., Fernandez L.P. Investigating the T-stub connection with different web-to-flange joint configurations // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 294. Pp. 1-17.
13. Francavilla A.B., Latour M., Tan P.J., Rizzano G. Ultimate behaviour of bolted beam-to-column connections in large rotations // *Proceedings in civil engineering*. 2023. Vol. 208. Pp. 2201-2205.
14. Semenov A.A., Malyarenko A.A., Porivaev I.A., Safiullin M.N. Stress-strain behavior investigation of friction grip bolts in flange joints of trusses // *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 5. Pp. 54-62. (rus)
15. Shafray K.A., Shafray S.D. Strength of welds flanges steel structures // *News of higher educational institutions. Construction*. 2018. No. 8. Pp. 36-47. (rus)
16. Shafray K.A., Shafray S.D. Features the work of flanged connections for building structures. Contact pressures and prying forces // *News of higher educational institutions. Construction*. 2013. No. 11. Pp. 89-96. (rus)
17. Ozkılıç Y.O., Topkaya C. The plastic and the ultimate resistance of four-bolt extended end-plate connections // *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. Vol. 181. Pp. 1-19.
18. Hu J.W., Leon R.T., Park T., Mechanical modeling of bolted T-stub connections under cyclic loads Part I: Stiffness modeling // *Journal of Constructional Steel Research*. 2011. Vol. 67. Pp. 1710-1718.
19. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection // *Materials*. 2020. Vol. 22. No. 13. Pp. 1-30.
20. EN 1993-1-8(2005): Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints.

21. AISC Manual of steel construction: Load & Resistance Factor Design, Second Edition, LRFD, 2nd Edition (Volume 2: Connections).
22. ANSI/AISC 358-16. Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications.
23. SP 294.1325800.2017 Steel structures. Design rules.
24. STO ARSS 11251254.001-021.01 Guide to designing steel structures of multi-storey buildings (Part 2. Nodes) (in development of SP 16.13330.2017 "Steel structures").
25. GB 51022-2015 Technical code for steel structure of light-weight building with gabled frames.
26. JGJ 82-2011 Technical specification for high strength bolt connections of steel structures.
27. Liu X., Zeng M., Wang Y. Research on design methods of high strength bolt T-stub tensile connections // Progress in Steel Building Structures. – 2023. – Vol. 25. No. 2. Pp. 23-31.
28. Zhang S., Chai C. Discussion on Calculation of Tensile Bearing Capacity and Prying Force in End Plate Joints // Steel Structures. – 2022. – Vol. 37. No. 5. Pp. 44-50.
29. Shi G., Shi Y., Wang Y. Calculation method on moment-rotation curves of beam-to-column semirigid end-plate connections // Engineering Mechanics. – 2006. – Vol. 23. No. 5. Pp. 67-73.
30. AISC. Steel Construction Manual. 16th Ed.
31. Series 2.440-2 Joints of steel structures of industrial buildings. Issue 7 Bolted flanged frame connections of beams with columns of steel frames of buildings and structures.
32. Guo B., Gu Q., Liu F. и Zhao K. Experimental Research on Hysteretic Behavior of End-plate Beam-column connections // Journal of Building Structures. – 2002. – Vol. 22. No. 3. – Pp. 8-13.
33. Guo B., Wang L., Wang Y., Shi Y., Tian H. Experimental study on rotational stiffness of steel frame beam-column connections // Journal of Building Structures. – 2011. – Vol. 32. No. 10. – Pp. 82-89.
34. Shi G., Shi Y., Wang Y., Li S., Chen H. Experimental study of semirigid end-plate connections in multi-story steel frames // Journal Tsinghua University (Sci & Tech). – 2004. – Vol. 44. No. 3. – Pp. 391-394.
35. Qin J., Pan J., Wang Z., Wang P., Chen S. Initial rotational stiffness of end-plate connections based on the theory of plates and shells // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 41. – Pp. 1-11.
36. Abidelah A., Bouchair A., Kerdal D.E. Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners // Journal of Constructional Steel Research. – 2012. – Vol. 76. – Pp. 13-27.

Информация об авторах

Сунь Гофэн

ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия,
аспирант кафедры строительных конструкций и механики грунтов,
E-mail: gofen.sun@urfu.ru

Миронова Людмила Ивановна

ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия,
д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф. кафедры строительных конструкций и механики грунтов,
E-mail: mirovali@urfu.ru

Лю Чун

ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия,
аспирант кафедры технологии и организации строительства,
E-mail: lc996463232@163.com

Information about authors

Sun Guofeng

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin, Yekaterinburg, Russia,
graduate student of the dep. of civil engineering and soil mechanics
E-mail: gofen.sun@urfu.ru

Mironova Lyudmila I.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin, Yekaterinburg, Russia,
doctor in ped. sc., candidate in tech. sc., prof. of the dep. of civil engineering and soil mechanics
E-mail: mirovali@urfu.ru

Liu Chong

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin, Yekaterinburg, Russia,
graduate student at the department of construction technology and organization
E-mail: lc996463232@163.com