



Research Article

Received: January 30, 2025

Accepted: February 13, 2025

Published: February 21, 2025

ISSN 2304-6295

# Reinforcement of end-plate connections under low cyclic loading

Sun, Guofeng<sup>1\*</sup> Mironova, Lyudmila Ivanovna<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin, Yekaterinburg, Russian Federation; guofeng.sun@mail.ru (S.G.); mirmila@mail.ru (M.L.I.)

Correspondence: \* email [guofeng.sun@mail.ru](mailto:guofeng.sun@mail.ru); contact phone [+79193637506](tel:+79193637506)

## Keywords:

Steel structures; End-plate connections; Low cyclic loading; Reinforcement; Stiffening ribs

## Abstract:

**The object of research** is the bolted end-plate connections beam to column, which is used in steel structures to ensure the reliability of column-beam and beam-beam connections. However, there is no reinforcement recommendation in the current normative documents for end-plate connections under low cyclic loading. **Method.** The reinforcement of bolted end-plate connections under low-cycle cyclic loading is investigated at the design stage using the finite element method and the component method. Stiffening ribs are one of the most effective and convenient methods to reinforce connections. Firstly, the force transfer characteristics of three kinds of stiffening ribs are analysed by finite element method, and the best geometric parameter scheme of stiffening ribs is found. On this basis, a method for calculating the bending capacity of connections with stiffening ribs is proposed. After that the work of beam-column nodes using different reinforcement methods under monotonic and cyclic loads was numerically analyzed. **Results.** Based on the results of the numerical analysis, the damage mechanism of the beam to column joint, the relationship between the variation of bolt internal forces with the number of loading stages, and the size of the gap between the end plate and the column flange were derived. The analysis concluded that reinforcement of the end plate connection at the design stage improves the strength of the connection, and the use of large diameter bolts, end plate stiffening ribs and column stiffening ribs prevents plastic hinging of the structural load-bearing elements of the connection, which ensures the safety of the connection under cyclic loading.

## 1 Introduction

Благодаря удобству монтажа на строительной площадке болтовые фланцевые соединения (ФС) чаще всего используются в промышленном сооружении и стальном каркасном здании. Установка ребер жесткости (РЖ) является одним из наиболее эффективных типов способов усиления узла балок с колонной, в том числе ребро жесткость фланца, ребро колонны, утолщение полки колонны и т.д. РЖ фланца передает часть внутреннего усилия полки балки фланцу и потом болтам [1].

С помощью функции напряжения и виртуальных напряжений принцип определено, что концентрация напряжений секторных пластин с жесткой заделкой в одной стороне и с шарнирной заделкой появится в том случае, когда угол пластины составляет  $63^\circ$  и  $61.3^\circ$  соответственно [2], [3]. Приведено экспериментальное испытание Т-образной модели с четырьмя болтами усилением РЖ и доказано о том, что в условиях, когда угол ребер равен  $63.5^\circ$ , коэффициент передачи внутренней силы через ребра имеет самое большое значение, который составляет 0.85 при текучести материала ребра [4]. Отмечено, что дополнительная деформация от текучести ребра фланца представляет собой составную часть угла поворота узла ФС, также выполнено исследование несущей способности и жесткости при растяжении РЖ через теоретический анализ и численный расчет [5]. Выявлено влияние треугольное РЖ на несущую способность и жесткость ФС в условиях монотонных нагрузок и разработан расчетный метод ФС при наличии ребра углом

Sun, G.; Mironova, L.

Reinforcement of end-plate connections under low cyclic loading;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 116 Article No 11603. doi: 10.4123/CUBS.116.3



63.4° [6], [7]. Представлена рекомендация по расчету ФС с учетом пластических деформаций и критерий работы ФС в стадию пластической деформации при использовании метода конечных элементов [8]. Авторы выполнили экспериментальное испытание ФС с начальным зазором и проанализировали работу болтов таких соединений. Высокопрочные болты ФС работают на растяжении, поэтому напряжение на болтах изменено при действии знакопеременных нагрузок, которое не позволяет обеспечивать надежность узла балки с колонной [9]. Выполнен вычисленный расчет ФС в условиях циклических нагрузок для определения напряженно-деформированного состояния и выявлено, что увеличение предварительного натяжения на болтах ведет к повышению сейсмостойкости и работоспособности таких соединений [10], [11]. Отметили, что установка ребер жесткости следует повысить несущую способность и жесткость ФС в условиях монотонных нагрузок и особых нагрузок, но не представлены рекомендации по выбору размера и формы ребер [12], [13]. Проведено исследование работы ФС при действии давления на верхнем торце колонны и при горизонтальном сейсмических воздействиях и отмечено, что стенка колонны на сдвиге представляет собой главный фактор влияния общей работоспособности узла балки с колонной [14]. Сделали исследование работы ФС при прогрессирующем обрушении конструкции при сносе колонны и представили рекомендации по обеспечению работы узла [15]. Выполнили сравнительный анализ для оценки точности существительных методик расчета прочности ФС [16].

С помощью РЖ увеличивается жесткость и прочность соединения узла. Ребро фланца работает на растяжении, а фланец – на изгибе. Оттого что работа на растяжении более эффективнее на изгибе, внутренняя сила полки балки передана ребрами жесткости. Положение для проектирования ФС в китайском нормативном документе GB 51022–2015 [17] указано, что для ФС отношение длиной стороны треугольного ребра к краткой стороне не менее 1:1.5, и в российских нормах SP 16.13330.2017 [18] и SP 294.1325800.2017 [19] «Конструкции стальные. Правила проектирования» есть рекомендация по требованию к материалу ребра. В Европейском нормативных документе EN 1993-1-8:2005 [20] нет рекомендации по проектированию РЖ при действии знакопеременных нагрузок [21]. Проведены эксперименты для исследования работы ФС с 8 болтами и проверена точность разработанной методики для расчета таких соединений с ребрами фланца на основании полученных данных испытаний [22], [23]. В практических проектах РЖ часто разрушено перед разрушения других элементов ФС, которое имеет форма равностороннего треугольника и толщину, как толщина стенки балки [24]–[26]. Актуальная задача – исследование принцип работы РЖ для повышения надежности узла с ФС.

В вышеописанных работах отсутствуют методы оценки несущей способности ребра жесткости ФС и не указываются эффективные решения усиления ФС. В данной статье проведено исследование метода усиления ФС в условиях знакопеременных мало-циклических нагрузок в стадии проектирования. Объект исследования представляет собой механическую модель и 3-Д модель ФС при наличии ребер жесткости. Предмет исследования – несущая способность ФС при наличии ребер жесткости и распределение усилий в болтах. Цель исследования – определение эффективного решения усиления ФС в качестве соединения балки с колонной. Задачей исследования является выявить влияние угла и формы РЖ на несущую способность и деформацию ФС. Разработана методика расчета прочности элементов на изгибе при наличии ребер. Также созданы 15 моделей для исследования работы ФС при монотонных и мало-циклических нагружениях.

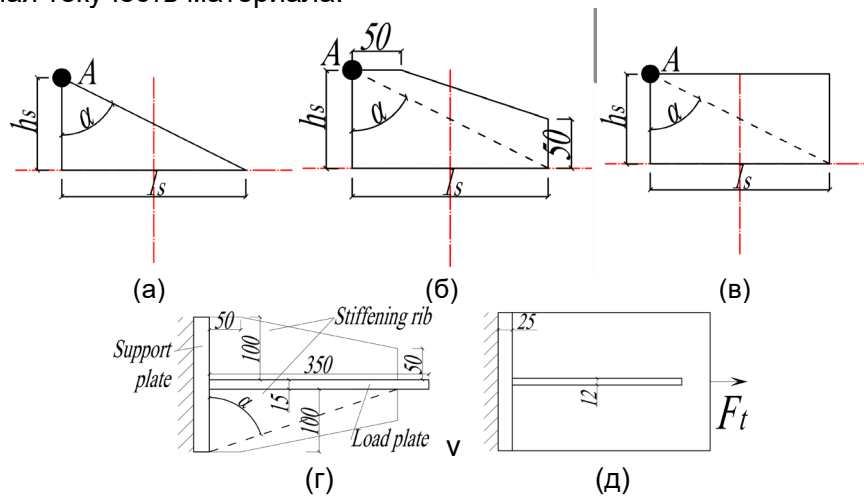
## 2 Materials and Methods

### 2.1 Проектирование ребра жесткости фланца

#### 2.1.1 Определение угла ребра

В нормативных документах отсутствуют положения для выбора угла и формы ребра. Создана Т-образная модель с тремя видами ребер, в том числе треугольный, многоугольный и прямоугольный, с помощью программы ANSYS 20.2 ([Ansys](https://www.ansys.com)). Угол ребер  $\alpha$  составляет от 10° по 72.5°. Толщина вертикальной плиты – 25mm, толщина горизонтальной плиты – 15mm, толщина ребер – 12mm и  $h_s = 100mm$ . В качестве контактной связи между плитой и ребрами принят тип контакта 'Bonded', который ограничивает перемещение в любом направлении. На рис.1 показаны геометрические параметры ребер и созданная модель. Сталь S255 используется для материала всех деталей модели. В расчете учитывается нелинейная деформация. Для этого принята

двухлинейная диаграмма упругопластической работы стали. Установлено, что между двумя плитами есть зазор 5мм, чтобы внутренняя сила передана только ребрами. На вертикальной плите установлена жесткая заделка. Установится растягивающая сила до момента, когда появится локальная текучесть материала.



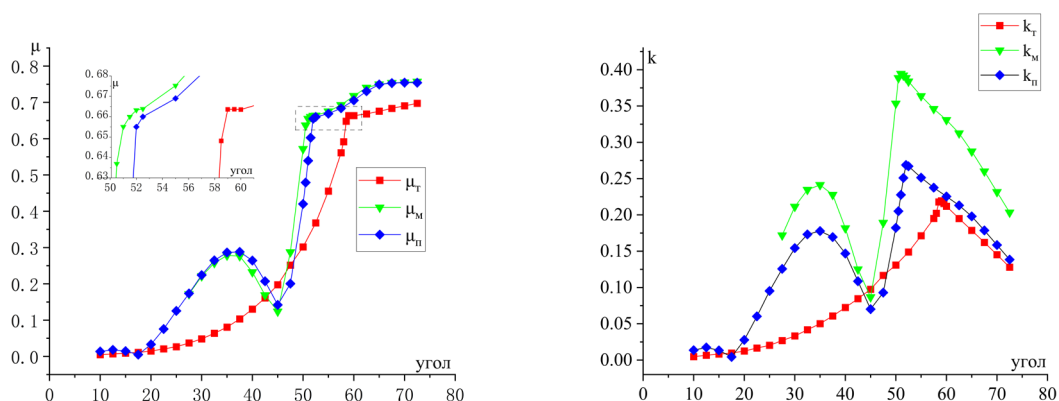
**Fig. 1 - Geometric parameter of the model**

**(a) triangular stiffening ribs; (б) polygonal stiffening ribs; (в) rectangular stiffening ribs; (г) geometric parameters of a T-shaped model with ribs; (д) load.**

**Рис. 1. Геометрический параметр модели**

**(a) треугольное ребро; (б) многоугольное ребро; (в) прямоугольное ребро; (г) геометрические параметры Т-образной модели с ребрами; (д) действующая нагрузка.**

В данной работе коэффициент передачи силы  $\mu$  для оценки особенности передачи внутренней силы ребрами предназначен, который составляет отношению эквивалентного напряжения в точке  $A$  к напряжению у корня ребра при текучести. Принят коэффициент передачи силы на единицу объема  $k$  в качестве показателя эффективности работы РЖ. На рис. 2 показана кривая зависимость  $\mu - \alpha$  и зависимость  $k - \alpha$ . Из рис.2 видно, что назначение  $\mu$  увеличивается при возрастании длиной стороны ребра  $l_s$ . В условиях  $\alpha = 72.5^\circ$  коэффициенты передачи силы треугольного ребра  $\mu_T$ , многоугольного ребра  $\mu_M$ , прямоугольного ребра  $\mu_{II}$  соответственно составляют 0.697, 0.757 и 0.754. На основании зависимости  $k - \alpha$  самым эффективным вариантом РЖ являются  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\alpha = 51^\circ$ ,  $\alpha = 52.5^\circ$  соответственно треугольной формы, многоугольной и прямоугольной. В этом случае  $\mu_T = 0.663$ ,  $\mu_M = 0.661$  и  $\mu_{II} = 0.66$ . Полученный результат для треугольной формы совпадает с выводом в работе [27], в которой представлено мероприятие избежать концентрации напряжений при  $\alpha = 60^\circ - 80^\circ$  для треугольной пластины. Действительно, с учетом удобства практики отношение длиной сторон  $l_s$  к краткой стороне  $h_s$  для треугольного РЖ, многоугольного и прямоугольного принято 2:1, 1.3:1 и 1.3:1.



**Fig. 2 – Dependence of end-plate connection operation on  $\alpha$**

(a)  $\mu - \alpha$  dependence; (б)  $k - \alpha$  dependence.

Рис. 2. Зависимость работы ФС от  $\alpha$

(a) зависимость  $\mu - \alpha$ ; (б) зависимость  $k - \alpha$ .

### 2.1.2 Метод расчета прочности ребра

Несущая способность короткой стороны ребра  $P_y$  определяется по формуле (1)

$$P_y = \mu f_y h_s t_s, \quad (1)$$

где,  $f_y$  – сопротивление стали при растяжении;

$h_s$  – длина короткой стороны РЖ;

$t_s$  – толщина ребра.

## 2.2 Расчет прочности элементов на изгибе

На рис.3 (а) показана расчетная модель ФС при наличии ребер. Благодаря РЖ внутренняя сила передана полкой балки и ребрами жесткости.

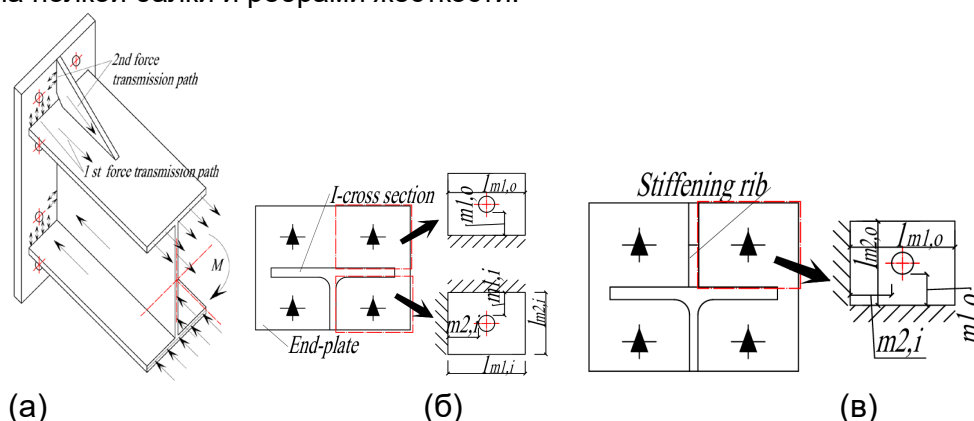


Fig. 3 – Design diagram of the end-plate connections with stiffener

(a) the path of force transmission; (б) design diagrams of the external zone of the end-plate and the internal zone; (c) outer area of the end-plate with stiffener.

Рис. 3. Расчетная схема ФС с ребрами

(a) передача внутренней силы; (б) расчетные схемы внешней зоны фланца и внутренней зоны; (в) внешняя зона фланца при наличии ребра.

В соответствии с строительной механикой и сопротивлением материалам учитывается внешняя зона фланца при отсутствии РЖ, как пластина с одной жесткой заделкой, а при наличии РЖ – пластина с двумя жесткими заделками, показанная на рис. 3 (б) и (в).

Напряжение корня фланца внешней зоны при отсутствии ребра  $\sigma_{f,i}$  определено по формуле (2), напряжение корня фланца внешней зоны при наличии ребра  $\sigma_{f,o}$  определено по формуле (3)

$$\sigma_{f,i} = \frac{6m_{1,o}N_{t1,1}}{l_{m1,o}t_f^2}, \quad (2)$$

$$\sigma_{f,o} = \frac{6(m_{1,o}N_{t1,1} + m_{2,o}N_{t1,2})}{(l_{m1,o} + l_{m2,o})t_f^2}, \quad (3)$$

где,  $t_f$  – толщина фланца;

$m_{1,o}$ ,  $m_{2,o}$  – расчетное плечо силы по пути 1 и по пути 2;

$N_{t1,1}$ ,  $N_{t1,2}$  – растягивающая сила, переданная по пути 1 и по пути 2, на болтах внешней зоны;

$l_{m1,o}$ ,  $l_{m2,o}$  – расчетная ширина в основе двух путей, которая подробно проанализирована в работе [28–30].

Полка колонны ФС также работает на изгибе. Оттого, что наличие поперечных ребер жесткости колонны следует разделить полки колонны на внешнюю часть и внутреннюю часть,

Sun, G.; Mironova, L.

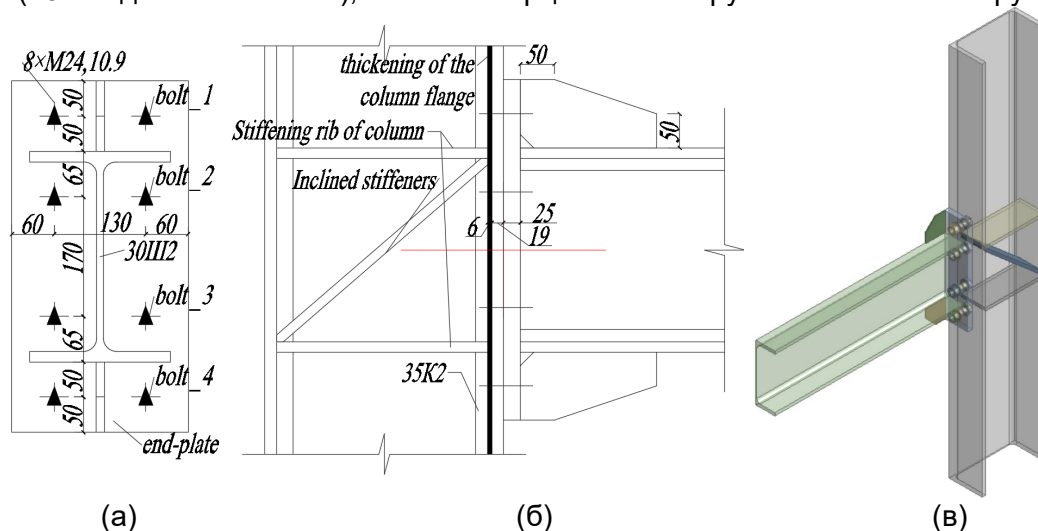
Reinforcement of end-plate connections under low cyclic loading;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 116 Article No 11603. doi: 10.4123/CUBS.116.3

которой расчетная схема и схема фланца подобны. Расчет полки колонны принципиально выполняется с помощью формул (2) и (3).

### 2.3 Численный расчет

Обратимся к численным расчетам, который служит для исследования эффективного и экономного способа усиления ФС при действии знакопеременных мало-циклических нагрузок в стадии проектирования. Созданы 15 моделей узла с ФС в половинном масштабе, который состоит из опорной колонны, балки, фланца, высокопрочных болтов и конструктивных элементов для усиления, в том числе три типа ребер фланца, поперечное ребро колонны, наклонное ребро колонны и утолщение полки колонны. В качестве эталонной модели принята 1-я модель при отсутствии способа усиления. В таблице 1 и на рис.4 показано конструирование каждой модели, расположение болтов и геометрические параметры. Для колонны принят двутавр 35К2, для балки – 40Ш2 в соответствии с ГОСТ Р 57837-2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия». Размер фланца – 25mm×250mm×500mm. Приняты высокопрочные болты М24 классом 10.9. Толщина ребер колонны равна толщине полки балки, а толщина ребер фланца, как толщина стенки колонны. Сталь С255 ( $f_y = 245MPa$ ,  $f_t = 370MPa$ , при толщине стали от 10mm до 20mm,  $f_y = 235MPa$ ,  $f_t = 370MPa$ , при толщине стали от 20mm до 40mm, модуль упругости  $E = 206000MPa$ ) используется для материала элементов ФС кроме болтов. Взаимодействие фланца и полки колонны моделировалось в виде фрикционного контакта с коэффициентом трения 0.5. Вследствие того, чтобы обеспечивать загрузить предварительное натяжение, принят гладкий контакт в качестве связи стрежни болтов и отверстий фланца и полки колонны под болтами. Также имитирован сварной шов типом контакта 'Bonded' и использован тип контакта 'No Separation', который ограничивает только продольное перемещение, для моделирования резьбы болтов. Шаг резьбы составляет 3mm и угла – 60°. Размер сеток фланца, колонны, и балки – 10mm, сеток шайбы – 2mm, сеток болтов – 3mm и сеток РЖ – 4mm. Монотонная нагрузка загрузится по двум шагам. Установлено предварительное натяжение (257kN для болтов М24), затем на торце балки загрузится внешняя нагрузка.



**Fig. 4 – Model of joint scheme and layout of strain gauges on beams of first series for bending tests (a) location of bolted end-plate connections; (б) location of stiffeners; (в) half-scale 3D model of the end-plate connections.**

**Рис. 4 – Модель узла**

**(а) расположение болтов ФС; (б) расположение ребер жесткости; (в) трехмерная модель ФС в половинном масштабе .**

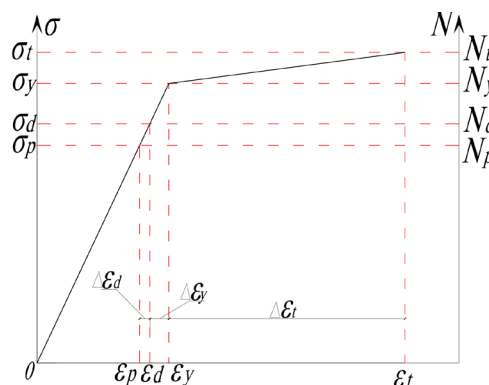
**Table 1. Construction of node models with end-plate connections  
Таблица 1. Конструирование моделей узла с ФС**

Номер	Наименование	Ребро фланца, $l_s/h_s$	Ребро колонны	Утолщение полки
1	$\Phi_1$	от.	от.	от.
2	$T_1$	1:1	от.	от.
3	$T_2$	2:1	от.	от.
4	$T_3$	3:1	от.	от.
5	$M_1$	1:1	от.	от.

6	$M_2$	1.3:1	от.	от.
7	$M_3$	3:1	от.	от.
8	$\Pi_1$	1:1	от.	от.
9	$\Pi_2$	1.3:1	от.	от.
10	$\Pi_3$	3:1	от.	от.
11	$K_1$	от.	П.	от.
12	$K_2$	от.	П. и Н.	от.
13	$K_3$	М, 1.3:1	П.	от.
14	$K_4$	М, 1.3:1	П. и Н.	от.
15	$У_1$	от.	от.	наличие

Примечания  
 1. от. – отсутствие; 2.  $\Phi_1$  – эталонная модель; 3.  $T_i$  – модель с треугольными ребрами,  $M_i$  – модель с многоугольными ребрами,  $\Pi_i$  – модель с прямоугольными ребрами,  $K_i$  – модель с ребрами колонны; 4. П. – поперечное ребро колонны, Н. – наклонное ребро колонны.

Опасным фактором для работы ФС в условиях знакопеременных нагрузок является высокопрочный болт на растяжении, так как усталость болтов при растяжении наиболее опасно. Проанализируем работу болтов с точки зрения характеристики материалов. На рис. 5 представлена упругопластическая диаграмма материала болта класса 10.9. К работе болтов относят следующие 5 этапов:



**Fig. 5 – Dependence of materials of high-strength bolts class 10.9**  
**Рис. 5 – Зависимость материалов высокопрочных болтов классом 10.9**

На 1-м этапе загрузится предварительное натяжение. В этом времени сила на болтах выражена по формуле (4)

$$N_p = \sigma_p A_0 = EA_0 \varepsilon_p, \quad (4)$$

где,  $N_p$  – сила от предварительного натяжения;

$\sigma_p$  – напряжение болтов от предварительного натяжения;

$A_0$  – расчетная площади сечения болтов, для болта M24  $A_0 = 353 \text{ mm}^2$  ;

$\varepsilon_p$  – деформация болтов от предварительного натяжения.

На 2-м этапе сила от внешней нагрузки не более предварительного натяжения. В этом случае  $0 < N_i \leq N_p$  ( $N_i$  – сила на болтах от внешней нагрузки), который ведет к постоянству напряженно-деформированного состояния.

На 3-м этапе загрузится до раскрытия фланца и полки колонны, т.е.  $N_p < N_i \leq N_d$  ( $N_d$  – сила на болтах, которая ведет к раскрытия). С помощью формулы (5-7) определены  $N_d$  и напряжение  $\sigma_d$

$$\Delta N_d = EA_0 \Delta \varepsilon_d, \quad (5)$$

$$N_d = (A_{f,p} / A_0 + 1) \Delta N_d = \Delta N_d + N_p, \quad (6)$$

$$\sigma_d = \sigma_p (A_{f,p} + A_0) / A_{f,p}, \quad (7)$$

где,  $\Delta N_d$  – приращение силы от предварительного натяжения до раскрытия фланца и полки колонны;

$\Delta \varepsilon_d$  – приращение деформации в этом этапе;

$A_{f,p}$  – площадь, в которой действует давление от силы на болтах, по сведением в работе [31]  $A_{f,p} / A_0$  принято 10-20. Для данного исследования взято  $A_{f,p} / A_0 = 10$ .

На 4-м этапе загрузится до текучести материала, т.е.  $N_d < N_i \leq N_y$  ( $N_y$  – сила на болтах в соответствии с пределом текучести). Расчет силы на болтах выполнен формулой (8)

$$N_y = \sigma_y A_0 = EA_0 \varepsilon_y, \quad (8)$$

где,  $\sigma_y$  – предел текучести стали болта;

$\varepsilon_y$  – деформации в 4-м этапе.

На 5-м этапе загрузится до сопротивления при растяжении, т.е.  $N_y < N_i \leq N_t$  ( $N_t$  – сила на болтах в соответствии с сопротивлением при растяжении). В то время сила на болтах выражается формулой (9)

$$N_t = \sigma_t A_0 = A_0 (E \varepsilon_y + E_s \Delta \varepsilon_t), \quad (9)$$

где,  $\sigma_t$  – сопротивление при растяжении;

$\Delta \varepsilon_t$  – приращение деформации в 5-м этапе;

$E_s$  – модуль в стадии упрочения материала.

### 3 Results and Discussion

#### 3.1 Результат численных расчетов

Представлены критерии о том, что элементы узла работают в стадии пластической деформации. К этим критериям относятся:

1. напряжение в элементе меньше предела текучести  $\sigma < f_y$  и также не превышает  $0.3\% f_y$ ;
2. Растягивающая сила на болтах  $N_i \leq N_y$ ;
3. Напряжение на ботах  $\sigma_i < \sigma_y$ ;
4. Зазор между фланцем и полкой колонны не более 1mm в соответствии с разделом 12.3.17 нормы СП294.1325800.2017.

#### 3.2 Форма разрушения узла

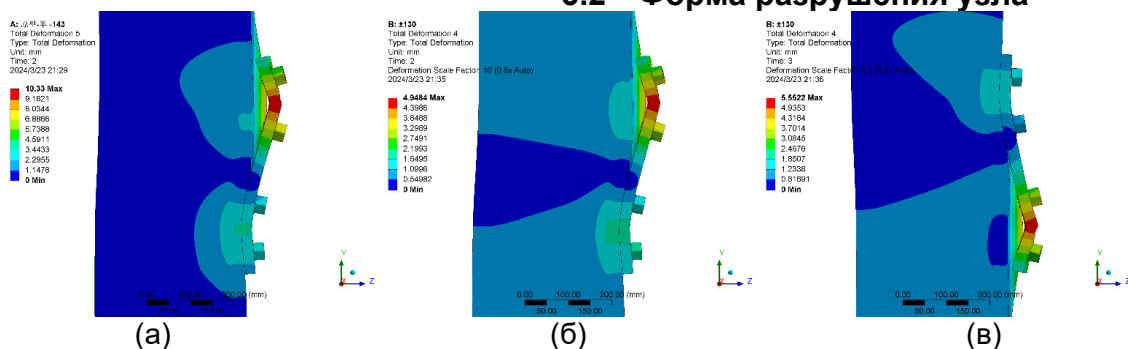


Fig. 6 – Deformed state of model  $\Phi_1$

(a) Deformed state at  $F_t = 143 \text{ kN}$ ; (б) at  $F_t = 130 \text{ kN}$ ; (в) at  $F_t = -130 \text{ kN}$ .

Рис. 6. Деформированное состояние модели  $\Phi_1$

(a) Деформированное состояние при  $F_t = 143 \text{ kN}$ ; (б) при  $F_t = 130 \text{ kN}$ ; (в) при  $F_t = -130 \text{ kN}$ .

Отсутствие ребер фланца и ребер колонны приведет к низкой жесткости полки колонны при изгибе и большой горизонтальной деформации фланца. На рис.6 показано деформированное состояние модели  $\Phi_1$ . Предельная монотонная нагрузка составляет 143kN. При действии такой

нагрузки появится текучесть нижней полки балки к стороне фланца и пластическая деформации в остальных элементах. В условиях знакопеременных нагрузок с постоянной амплитудой  $\pm 130\text{kN}$  большой зазор между фланцем и полкой колонны расположен на геометрическом центре полки балки, где передана внутренняя растягивающая сила, а между краем фланца и полкой колонны нет зазора.

В модели  $T_1$  зазор находится на внешней зоне частичного фланца на растяжении и соответствующем положении полки колонны. Следовательно, из-за отсутствия ребер колонны фланец относительно сильнее и вращается около геометрического центра связи фланца и полки колонны на изгибе. Для данной модели предельная монотонная нагрузка равна  $155\text{kN}$ . При такой нагрузке возникнут текучесть нижней полки балки и текучесть нижнего ребра жесткости фланца на сжатии. В условиях знакопеременных нагрузок модель ФС обладает маленьким зазором в зоне на растяжении благодаря наличию ребер жесткости. Однако, напряжение в конструктивных элементах больше по значению, чем при действии предельной монотонной нагрузки, так как проводится накопление остальной деформации и остальных напряжений в процессе циклического нагружения.

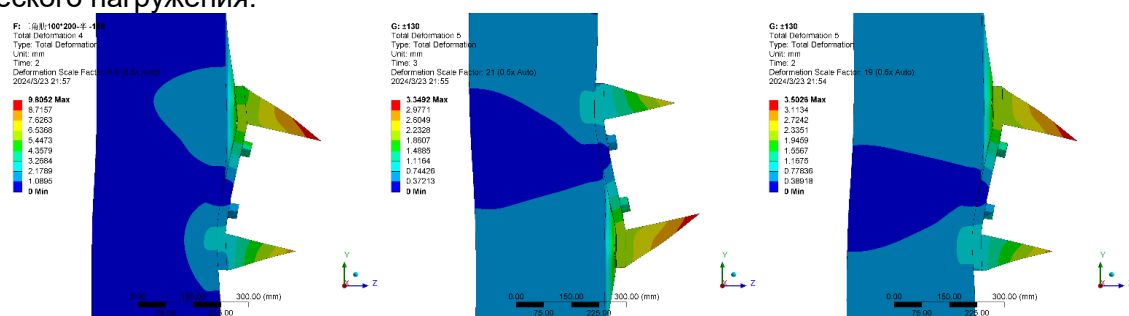


Fig. 7 – Deformed state of model  $T_2$

(a) Deformed state at  $F_t = 155\text{kN}$ ; (б) at  $F_t = 155\text{kN}$ ; (в) at  $F_t = -130\text{kN}$ .

Рис. 7 – Деформированное состояние модели  $T_2$

(a) Деформированное состояние при  $F_t = 155\text{kN}$ ; (б) при  $F_t = 130\text{kN}$ ; (в) при  $F_t = -130\text{kN}$ .

На рис.7 показано деформированное состояние модели  $T_2$ . Конструирование моделей нормов 3 – 10 ( $T_2$ –  $T_3$ ) и конструирование модели  $T_1$  похожи по наличию ребер жесткости фланца. Потеря функции нижней полки балки и нижнего ребра фланца этих моделей появилась в условиях монотонной нагрузки  $155\text{kN}$ . Эти модели также подобны по работоспособности в условиях знакопеременных нагрузок.

По сравнению формы разрушения вышеописанных 10 моделей с моделью  $K_1$  стенка колонны модели  $K_1$  работает на сдвиге и поперечные ребра колонны поддерживают ее. Из-за отсутствия ребер фланца текучесть нижней полки балки появится при действии нагрузки  $143\text{kN}$ . В условиях знакопеременных нагрузок проходящий зазор расположен в зоне на растяжении от того, что край фланца и полка колонны не совместно деформируются.

Форма разрушения модели  $K_2$  похожа на форму разрушения модели  $K_1$ . Благодаря наличию поперечных ребер жесткости стенка колонны и сдвигающая деформация стенки колонны ограничена.

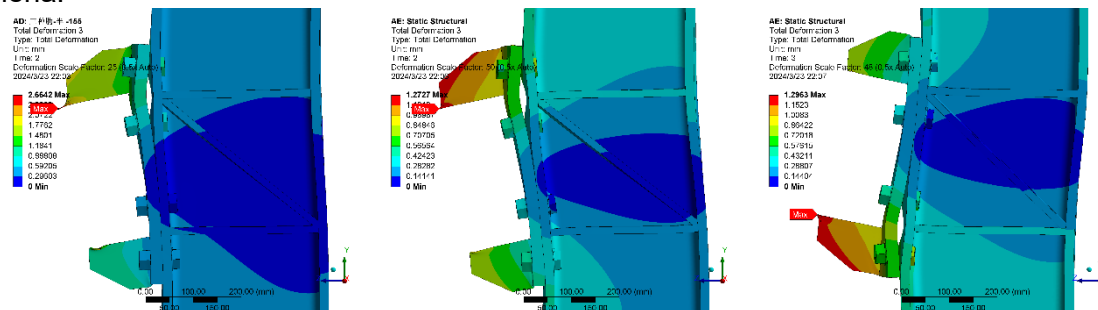


Fig. 8 – Deformed state of model  $K_4$

(a) Deformed state at  $F_t = 155\text{kN}$ ; (б) at  $F_t = 130\text{kN}$ ; (в) at  $F_t = -130\text{kN}$ .

Рис. 8 – Деформированное состояние модели  $K_4$

(a) Деформированное состояние при  $F_t = 155\text{kN}$ ; (б) при  $F_t = 130\text{kN}$ ; (в) при  $F_t = -130\text{kN}$ .

Модель  $K_3$  обладает преимуществами модели при наличии поперечного ребра колонны и ребра фланца. Предельная монотонная нагрузка составляет 155кН, и стенка колонны работает на сдвиге. В этом случае ребро жесткости фланца в зоне на сжатии вступает в стадию пластической деформации. При действии знакопеременных нагрузок ребро жесткости работает на растяжении и также на сжатии с изменением нагрузок. Концентрация напряжений находится в точке длинной стороны ребер, так как целые ребра жесткости работают в стадии пластической деформации, а ребра жесткости – в стадии упругой деформации. На рис.8 показано деформированное состояние модели  $K_4$ . Модель  $K_4$  обладает похожей работоспособностью, как модель  $K_3$ , и усиленной стенкой колонны.

Для модели  $Y_1$  предельная нагрузка составляет 143кН. В условиях знакопеременных нагрузок и монотонных нагрузок имеет подобную форму разрушения, работоспособность, как у модели  $\Phi_1$ .

### 3.3 Анализ результатов

#### 3.3.1 Внутреннее усилие на болтах

В начале нагружения постоянная сила на болтах, как вследствие, контроль предварительного натяжения. С увеличением внешних нагрузок возвращается сила на болтах. Работоспособность болтов совпадает вышеописанным процессом. На рис. 9 показана зависимость силы на болтах от величины внешней нагрузки. В табл. 2 представлена растягивающая сила на болтах.

На рис.9 показано, что болты работают в стадии упругой деформации в соответствии с вышеописанным анализом высокопрочных болтов на растяжении. Значение максимального усилия на болтах не зависит от наличия ребер жесткости. Появится зазор между фланцем и полкой колонны, когда растягивающая сила на болтах составляет 281.6кН. На этих графиках усилие на болтах меньше значения предварительного натяжения (256кН) от характеристики нагрузки 'Bolt Pretension' в программе ANSYS 20.2, потому что в зоне соединения на сжатии есть тенденция к деформированию полки и деформированию фланца не вместе от того, что их жесткость различна друг от друга и появилась рычажная сила на кромке фланца. Рычажная сила практически расположена у свободной кромки фланца [32]. Следовательно, по сути, такое состояние ФС является отсутствием зазором между фланцем и полки колонны. Амплитуда изменения растягивающей силы на болтах служит выявлением работоспособности ФС в условиях знакопеременных нагрузок и совместным деформированием фланца и полки колонны.

При отсутствии РЖ амплитуда изменения усилия на болтах больше амплитуды изменения усилия на болтах при наличии РЖ в одном цикле нагружения. РЖ предназначает для усиления жесткости фланца, колонны и устранения рычажной силы.

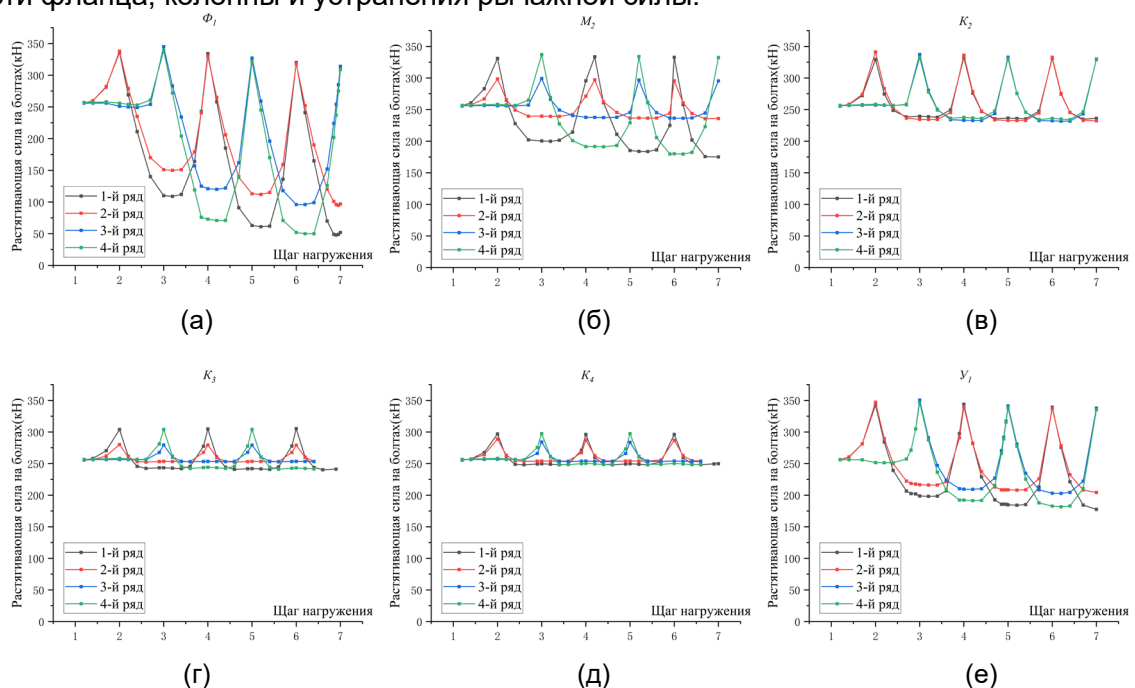


Fig. 9 – Dependence of the force on the bolts ( $N_b$ ) on the loading step ( $n$ )

(a) dependence  $N_b - n$  of model  $\Phi_1$ ; (б) dependence  $N_b - n$  of model  $M_2$ ; (в) dependence  $N_b - n$  of model  $K_2$ ; (г) dependence  $N_b - n$  of model  $K_3$ ; (д) dependence  $N_b - n$  of model  $K_4$ ; (е) dependence  $N_b - n$  of model  $Y_1$ .

Рис. 9 – Зависимость силы на ботах ( $N_b$ ) от шага нагружения ( $n$ )

(а) зависимость  $N_b - n$  моделей  $\Phi_1$ ; (б) зависимость  $N_b - n$  моделей  $M_2$ ; (в) зависимость  $N_b - n$  моделей  $K_2$ ; (г) зависимость  $N_b - n$  моделей  $K_3$ ; (д) зависимость  $N_b - n$  моделей  $K_4$ ; (е) зависимость  $N_b - n$  моделей  $Y_1$ .

Table 2. Tensile force on bolts  
Таблица 2. Растягивающая сила на болтах

Модель	$N_{t1,1}$	$N_{t2,1}$	$N_{t1,7}$	$N_{t2,7}$	$\Delta N_{t1}$	$\Delta N_{t2}$	$N_{t1,1} / N_{t2,1}$	$N_{t1,7} / N_{t2,7}$	$M_u$
$\Phi_1$	336	338	52	97	284	286	0.994	0.536	143
$T_1$	329	312	164	211	165	148	1.054	0.777	155
$T_2$	330	301	175	233	155	126	1.096	0.751	155
$T_3$	332	297	174	238	158	123	1.118	0.731	155
$M_1$	329	305	174	227	155	131	1.079	0.767	155
$M_2$	333	295	174	241	159	121	1.129	0.722	155
$M_3$	334	295	173	242	161	122	1.132	0.715	155
$\Pi_1$	329	305	175	227	154	130	1.079	0.771	155
$\Pi_2$	331	299	174	236	157	125	1.107	0.737	155
$\Pi_3$	334	294	173	243	161	121	1.136	0.712	155
$K_1$	337	330	207	218	130	123	1.021	0.950	143
$K_2$	329	341	234	232	95	106	0.965	1.012	143
$K_3$	304	280	242	254	62	38	1.086	0.953	155
$K_4$	297	289	250	254	47	39	1.028	0.984	155
$Y_1$	343	347	178	204	165	169	0.988	0.873	143

Примечания

1.  $N_{i,j}$  – сила на болтах  $i$ -го ряда в  $j$ -м цикле нагружения;
2.  $\Delta N_{i1}$  – разница силы на болтах  $i$ -го ряда в 1-м цикле и в 7-м цикле;
3.  $M_u$  – предельная монотонная нагрузка.

При действии предельных монотонных нагрузок растягивающая сила на болтах второго ряда модели  $\Phi_1$  по значению больше, чем первого ряда, также получится отношение  $N_{t1,1} / N_{t2,1} = 0.994$ . В работе [33], [34] подчеркивается, что такое отношение связано с тем, что для внутренней зоны фланца стенка балки работает, как ребро жесткости, поэтому внутренняя зона обладает больше жесткостью при изгибе. В условиях знакопеременных нагрузок изменение силы на болтах внешней зоны также больше, чем на болтах внутренней зоны, от того, что жесткость внутренней зоны фланца больше жесткости внешней зоны.

Для модели  $T_1$  изменение распределения силы на ботах, как вследствие, увеличение жесткости при изгибе внешней зоны фланца. В то время, когда нагрузка достигнет 130kN, растягивающая сила на 1-м ряду составляет 330kN, а на 2-м ряду – 312kN. Для моделей при наличии ребер жесткости фланца отношение  $N_{t1,1} / N_{t2,1}$  расположено в диапазоне (1.054, 1.136). Изменение силы на болтах 1-го ряда и на болтах 2-го ряда постоянно, т.е. изменение силы на болтах не зависит от геометрической формы ребер жесткости фланца. В соответствии с данными про измену силы на болтах в табл. 2 также можно сделать вывод о том, что эффективным решением ребер жесткости с треугольной, многоугольной и прямоугольной формой является ребра с  $l_s / h_s = 2, 1.3$  и  $1.3$  соответственно. Применение ребер жесткости фланца ведет к распределению силы на болтах и ограничению изменению силы. Для моделей при отсутствии ребер фланца отношение  $N_{t1,1} / N_{t2,1}$  меньше единицы. Применение ребер гарантирует работу болтов в стадии упругой деформации.

### 3.3.2 Зазор между фланцем и полкой колонны

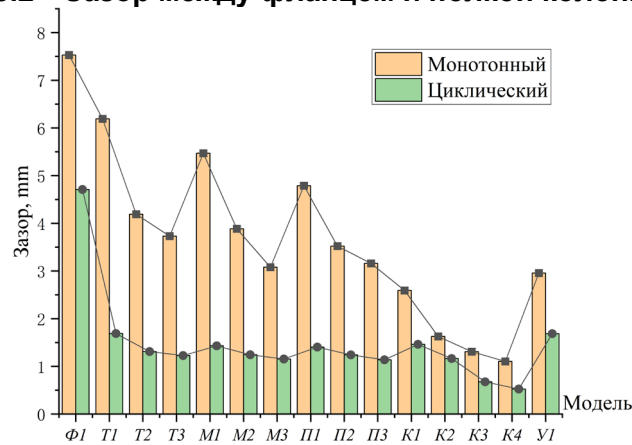


Fig. 9 – The size of the gap between the flange and the column flange

Рис. 9 – Величина зазора между фланца и полкой колонны

На рис.10 показан максимальный зазор каждой модели в процессе монотонных нагружений и циклических знакопеременных нагружений. По сведениям отметим, что поперечным ребром колонны обеспечена изгибающая деформация полки колонны, ребром фланца гарантирована изгибающая деформация фланца и наклонным ребром колонны усилена стенка колонны. Принятие трех типов ребер в качестве способа усиления узла с ФС следует получить зазор между фланцем и полкой колонны 1.11mm, которая гораздо меньше зазор эталонной модели 7.53mm. В условиях знакопеременных нагрузок величина зазора составляет 0.523mm, которая меньше 1mm. В основе зависимости величины зазора от размера ребер фланца также свидетельствуется, что эффективное решение представляет собой ребро треугольной формы с  $l_s / h_s = 2$ , ребро многоугольной формы  $l_s / h_s = 1.3$  и ребро прямоугольной формы  $l_s / h_s = 1.3$ .

### 3.3.3 Сравнительный анализ

По сравнению моделей при наличии ребер жесткости фланца с моделью  $K_3$  поперечные ребра жесткости колонны позволяет гарантировать текучести элементов на сжатии, повышать несущую и деформированную способность элементов соединения, улучшить пластичность узла.

Модель при наличии ребер жесткости колонны и отсутствии ребер фланца обладает лучше пластичностью и предельную деформированную способность. Также проведено сравнение моделей  $K_1$  и  $K_2$  с моделью  $K_4$ . Ребро фланца следует повысить предельную монотонную нагрузку и начальную жесткость при изгибе. В работе [35]представлена рекомендация о том, что при выборе болтов с большим диаметром ребра жесткости фланца служат по повышению сейсмостойкости узла колонны с балкой.

На основании зависимости силы на болтах от нагружения можно сделать вывод, что ребра жесткости позволяют снизить максимальное значение силы на болтах и подобное распределение усилия, поэтому для определения несущей способности, воспринимающей болтами, принята Т-образная модель, т.е. растягивающая сила равномерно распределяется на болтах.

В процессе монотонных и знакопеременных нагружений ребра жесткости работает на растяжении и на сжатии и локальное напряжение на ребре превышает предел текучести. В этой статье рекомендуем, что приняты ребра жесткости фланца с многоугольной формой и  $l_s / h_s = 1.3$ , поперечные ребра колонны и наклонные ребра колонны для ограничения изгибающей деформации полки колонны, сдвигающей деформации стенки колонны, снижения амплитуды напряжения на болтах.

В соответствии с напряженно-деформированным состоянием узла принятие ребер предназначает для расхода переданной энергии и расположения пластической механизмы в ребрах вместо болтов и фланца.



## 4 Conclusions

В действующих нормах отсутствуют положения для проектирования узла с ФС при наличии ребер жесткости. В данной статье проведено исследование усиления ФС в стадии проектирования. Можно сделать следующие выводы:

1. При предельном состоянии ребро треугольной формы с углом  $\alpha = 60^\circ$ , ребро многоугольной формы  $\alpha = 51^\circ$  и ребро прямоугольной формы  $\alpha = 52.5^\circ$  обладает наиболее высоким значением коэффициента передачи силы и применение многоугольного ребра более эффективно, чем другие два варианта;
2. На основании схемы передачи внутренней силы разработаны расчетные методики для определения несущей способности фланца и полки колонны ФС при наличии ребер жесткости;
3. По сведениям численного расчета показано, что применение поперечных ребер колонны позволяет ограничить деформации полки колонны, изменять состояние работы стенки колонны, применение наклонных ребер служит для уменьшения сдвигающей деформации стенки колонны, изменение рабочего состояния ребер фланца предназначено для повышения несущей способности нижней полки балки, поэтому использование трех типов ребер представляет собой эффективное решения усиления ФС балки с колонной в условиях знакопеременных нагрузок;
4. Утолщение локальной полки колоны ведет к повышению жесткости при изгибе, но расход стали больше, чем применение ребер жесткости;
5. В условиях монотонных и знакопеременных нагрузок на усиленном узле с ФС внутренняя сила на болтах равномерно распределена, поэтому позволяет упростить изгибающий момент, воспринимаемый балкой, как одна пара силы.
6. Принятие сочетания ребер приведет к повышению жесткости узла, и пластическая механизма расположена в ребрах, которые обеспечивают работу остальных элементов ФС.

## 5 Conflict of Interests

The authors declare no conflict of interest.

### Reference

- 1 Shi, Y.J., Shi, G. and Wang, Y.Q. (2007) Experimental and Theoretical Analysis of the Moment–Rotation Behaviour of Stiffened Extended End-Plate Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, **63**, 1279–1293. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.11.008>
- 2 Adey, B.T., Grondin, G.Y. and Cheng, J.J.R. (2000) Cyclic Loading of End Plate Moment Connections. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **27**, 683–701. <https://doi.org/10.1139/I99-080>
- 3 Hsiao, J.K., Chambers, J.J. and Schultz, W.J. (2005) Stress Singularity Effect on Beam Flanges in Moment Connections. *Advances in Structural Engineering*, **8**, 143–156. <https://doi.org/DOI:10.1260/1369433054038010>
- 4 Zhao, W. and Tong, S.G. (2012) Demand on Stiffeners in Stiffened Extended End-Plate Connections. *Advances in Structural Engineering*, **15**, 1455–1470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1260/1369-4332.15.8.1455>
- 5 Ma, K., Ye, X., Yu, H. and Jin, T. (2022) Research on Deformation and Numerical Simulations of Beam-to-Column Joints for Prefabricated Steel Frames. *INDUSTRIAL CONSTRUCTION*, **52**, 94–100. <https://doi.org/doi:10.13204/j.gyjzG21062514>
- 6 Tong, S.G. and Zhao, W. (2006) Effects of End-Plate Stiffener on Behavior of Extended End-Plate Beam-to-Column Connections. *JOURNAL OF SICHUAN UNIVERSITY (ENGINEERING SCIENCE EDITION)*, **38**, 39–43. [https://doi.org/1009-3087\(2006\)04-0039-05](https://doi.org/1009-3087(2006)04-0039-05)
- 7 Tong, S.G. and Zhao, W. (2005) Design Approach of Stiffeners in Extended End Plate Connections and Finite Element Analysis. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, **21**, 616–620. [https://doi.org/1671-2021\(2005\)06-0616-05](https://doi.org/1671-2021(2005)06-0616-05)
- 8 Vedyakov, I.I., Konin, D.V., Olurombi A. K. and Nakhvalnov, P.V. (2021) Consideration of Plastic Deformations in Calculations of Flange Connections. *Industrial and Civil Engineering*, 9–16. <https://doi.org/DOI:10.33622/0869-7019.2021.10.09-16>



- 9 Tusnin, A.R. and Platonova, V.D. (2023) Influence of Gaps in Flange Joints on the Stress-Strain State of the Unit. *Vestnik MGSU*, **18**, 1763–1779. <https://doi.org/DOI:10.22227/1997-0935.2023.11.1763-1779>
- 10 Noferesti, H. and Gerami, M. (2023) Cyclic Behavior of Bolted Stiffened End-Plate Moment Connections for Different Bolt Pretensioning Levels: An Experimental Study. *Shock and Vibration*, **2**. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2023/5330905>
- 11 Quayyum, S. and Kohany, T.R. (2021) Improving Seismic Performance of Eight Bolt Extended End Plate Moment Connection. *Steel and Composite Structures*, **41**, 403–416. <https://doi.org/DOI:10.12989/scs.2021.41.3.403>
- 12 Gjukaj, A., Salihi, F., Muriqi, A. and Cvetanovski, P. (2023) Numerical Behavior of Extended End-Plate Bolted Connection under Monotonic Loading. *HighTech and Innovation Journal*, **4**, 294–308. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.28991/HIJ-2023-04-02-04>
- 13 Osman, A.A. and Mourad, S.A. (2021) Performance of Extended End-Plate Bolted Connections Subjected to Static and Blast-like Loads. *Journal of Engineering and Applied Science*, **68**, 1–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s44147-021-00001-3>
- 14 Luo, L., Du, M., Yuan, J., Shi, J., Yu, S. and Zhang, Y. (2020) Parametric Analysis and Stiffness Investigation of Extended End-Plate Connection. *Materials (Basel)*, **13**, 1–30. <https://doi.org/DOI:10.3390/ma13225133>
- 15 Barmaki, S., Sheidaii, M.R. and Azizpour, O. (2020) Progressive Collapse Resistance of Bolted Extended End-Plate Moment Connections. *International Journal of Steel Structures*, **20**, 1165–1179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13296-020-00349-x>
- 16 Nassani, D.E., Chikho, A.H. and Akgönen, A.I. (2017) Semi-Rigidity of Cap Plate and Extended End Plate Connections. *Steel and Composite Structures*, **23**, 493–499. <https://doi.org/DOI:10.12989/scs.2017.23.5.493>
- 17 (2015) GB 51022-2015 Technical Code for Steel Structure of Light-Weight Building with Gabled Frames. China Architecture & Building Press, Beijing. <https://www.guifan.cc/guifan/12818.html>
- 18 (2017) SP 16.13330.2017 Steel Structures. Moscow. <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14474/>
- 19 (2017) SP 294.1325800.2017 The Construction of Steel. Design Rules. Moscow. <https://docs.cntd.ru/document/456088764>
- 20 (2005) EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-8: Design of Joints. <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-3-design-steel-structures>
- 21 Tartaglia, R., D’Aniello, M. and Landolfo, R. (2018) The Influence of Rib Stiffeners on the Response of Extended End-Plate Joints. *Journal of Constructional Steel Research*, **148**, 669–690. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.025>
- 22 Abldelah, A., Bouchaïr, A. and Kerdal, D.E. (2012) Experimental and Analytical Behavior of Bolted End-Plate Connections with or without Stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, **76**, 13–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.04.004>
- 23 Lee, J.S., Lee, H.D., Lee, S.H., Woo, J.H. and Shin, K.J. (2023) Strength Evaluation of End-Plate Connections Using Stiffness Reduction Factor. *International Journal of Steel Structures*, **23**, 795–805. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13296-023-00730-6>
- 24 Wang, A., Zhang, Z., Ji, J. and Liu, Y. (2022) Study on Neutral Axis Location of Common Bolts of Flush End-Plate Connections. *Results in Engineering*, **16**, 1–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100683>
- 25 Özkılıç, Y.O. and Topkaya, C. (2021) Extended End-Plate Connections for Replaceable Shear Links. *Engineering Structures*, **240**, 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112385>
- 26 Özkılıç, Y.O. (2022) Cyclic and Monotonic Performance of Stiffened Extended End-Plate Connections with Large-Sized Bolts and Thin End-Plates. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **20**, 7441–7475. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10518-022-01496-8>
- 27 Williams, M.L. (1952) Stress Singularities Resulting From Various Boundary Conditions in Angular Corners of Plates in Extension. *J. Appl. Mech.*, **19**, 526–528. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.4010553>
- 28 Qin, J.G., Pan, J.R., Wang, Z., Wang, P. and Chen, S.Z. (2021) Initial Rotational Stiffness of End-Plate Connections Based on the Theory of Plates and Shells. *Journal of Building Engineering*, **41**. <https://doi.org/DOI:10.1016/j.jobbe.2021.102764>



- 29 Özkılıç, Y.O. and Topkaya, C. (2021) The Plastic and the Ultimate Resistance of Four-Bolt Extended End-Plate Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, **181**, 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106614>
- 30 Nadolski, V. (2018) Calculation and Construction of the Flange Connection of Rectangular Elements Subjected to the Axial Tension. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, 121–130. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36386817>
- 31 Dan, Z., Chai, C., LI, G. and Tong, S. (2019) Manual of Steel Structure Desugn. 4th ed., China Architecture & Building Press, Beijing. <https://book.douban.com/subject/31105206/>
- 32 Shafray, K.A. and Shafray, S.D. (2013) Features the Work If Flanged Connections for Building Structures. Contact Pressure and Prying Forces. *News of higher educational institutions. Construction*, 89–96. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21426571/>
- 33 Chen, S.F. (2014) Further Investigation into the Joint Rigidity of Portal Frames. *Steel Construction*, **29**, 1–3. <https://doi.org/doi:10.13206/j.gjg201410001>
- 34 Jia, J., Liu, W. and Tu, B. (2017) Experimental Study on the Seismic Behavior of Steel Ultra High Strength Concrete Frame Joints. *Journal of Harbin Engineering University*, **38**, 160–167. <http://dx.doi.org/10.11990/jheu.201509071>
- 35 William, J. (2000) FEMA-355D State of the Art Report on Connection Performance. California. [https://store.atcouncil.org/index.php?dispatch=products.view&product\\_id=99](https://store.atcouncil.org/index.php?dispatch=products.view&product_id=99)