

Аналитическая модель метода переменных параметров упругости для расчета фланцевых соединений двутавровой балки с колонной

Ф. А. Глебов, И. В. Астахов, В. И. Корсун, Л.Н, Кондратьева,

В. Цыгановкин

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

Аннотация: Статья посвящена исследованию нелинейного поведения фланцевых соединений двутавровой балки с колонной. В процессе исследования была создана упрощенная аналитическая модель с использованием метода переменных параметров упругости для определения напряженно-деформированного состояния данных соединений. Предложенная механическая модель позволяет прогнозировать прочность, жесткость, пластичность соединений, а также возможные типы разрушения и механизмы деформации изгибаемых элементов фланцевых соединений. Эта модель может быть полезной для инженеров и специалистов в области проектирования и анализа металлоконструкций. Предложенная уточненная компонентная модель является аналогом модели Еврокод 3. В работе представлен численный эксперимент по моделированию узла соединения балки с колонной методом конечных элементов, приведен сравнительный анализ полученных результатов с результатами испытаний фланцевых соединений стальных строительных конструкций, выполненных Сиднейским Университетом (USYD).

Ключевые слова: фланцевые соединения, фланцевая пластина, напряженно-деформированное состояние, метод переменных параметров упругости, компонентный метод, уточненная компонентная модель, метод конечных элементов, упруго-пластическое состояние, пластический шарнир, модифицированная жесткость, модель изгиба фланцевой пластины, модель диссипативного поведения материала.

Введение

Назначение несущих конструкций заключается в обеспечении прочности, устойчивости и пространственной жесткости сооружения на всех этапах его жизненного цикла, начиная со стадии строительства и заканчивая всем периодом эксплуатации. Поведение узлов играет ключевую роль в распределении внутренних усилий и перемещений в элементах стальных конструкций. Фланцевое соединение – это один из наиболее эффективных и надежных типов соединений основных несущих конструкций, который широко используется на практике.

В соответствии с современными тенденциями в области проектирования, расчетная модель должна точнее отражать реальные условия работы стальных конструкций.

Из анализа работ, посвященных исследованиям фланцевых соединений, следует выделить три основных подхода: экспериментальный, использование конечно-элементных моделей (далее МКЭ) и применение математических зависимостей, коэффициенты которых могут иметь конкретное физическое содержание (экспериментально-теоретический). Основными недостатками первых двух подходов являются: в первом случае — невозможность охватить все многообразие конструктивных форм узлов, во втором — неудобство использования в инженерных расчетах [1].

Принимая во внимание требования, предъявляемые к расчетным моделям строительных конструкций, в настоящее время становится актуальным определение основных параметров соединения, особенно на предварительной стадии расчета. При разработке проекта сооружения фактические параметры соединения не всегда заранее известны, однако, необходимо уметь прогнозировать их работу.

Моделирование с применением МКЭ является точным и надежным методом анализа сложных моделей соединений. Однако, этот метод нецелесообразен для практического использования на стадии вариантного проектирования и требует применения дорогостоящего программного обеспечения. Выходом может стать создание теоретической модели, которая позволила бы разработать простой и точный метод моделирования нелинейного поведения соединений.

Одним из основных методов моделирования работы стальных конструкций в Еврокод 3 является «компонентный» метод. Данный подход к расчету узлов стальных конструкций имеет ряд преимуществ. Он универсален и может применяться к широкому спектру узлов и соединений, позволяет учитывать развитие пластических деформаций.

Ключевая особенность компонентного метода заключается в рассмотрении прочностных и деформационных характеристик каждого

компонента, входящего в соединение. Опыт проектирования показывает, что одни элементы склонны к хрупкому разрушению, другие работают в условиях ограниченных пластических деформаций. Для третьей группы характерна высокая пластичность (участок стенки колонны при работе на сдвиг, полка колонны, фланцевая пластина). Данная группа элементов представляет наибольший интерес, поскольку вносит значительный вклад в напряженно-деформированное состояние соединения в целом [2, 3].

В соответствии с основными принципами расчета строительных конструкций, работа в стадии пластических деформаций для элементов узла, относящихся к колонне, нежелательна, поскольку колонны критически важны для общей устойчивости сооружения. Вместе с тем, исследование напряженного-деформированного состояния фланцевой пластины при изгибе является ключевым вопросом в контексте моделирования работы соединения [4, 5].

В данной статье представлена модель работы фланцевых пластин с применением метода переменных параметров упругости, а также приведена уточненная компонентная модель фланцевого соединения двутавровой балки с колонной. Модель позволяет проектировать фланцевые соединения стальных строительных конструкций с требуемыми параметрами жесткости и напряженно-деформированного состояния на этапе вариантного проектирования без использования дорогостоящих программных пакетов МКЭ.

Методы

В соответствии с концепцией Еврокод 3 для расчета работающей на изгиб фланцевой пластины применяется метод ее разделения на отдельные Т-образные элементы. В рамках этого метода фланцевые соединения рассматриваются как совокупность таких элементов (Рис. 1а). Ключевой особенностью подхода является замена сложной схемы текучести в зоне

растяжения простой моделью, которая легче поддается расчёту. Вместо изгибаемой пластины принимается элемент эквивалентной жесткости и осуществляется переход к плоской модели задачи.

Работающая на изгиб фланцевая пластина и полка колонны существенно влияют на пластичность соединения [6]. Для исследования поведения фланцевых соединений в работе принята механическая модель в виде двух эквивалентных Т-образных элементов с различной толщиной фланцевых пластин.

Как отмечает автор работы [7], эквивалентный Т-образный элемент используется для описания поведения полки колонны и фланцевой пластины при работе на изгиб. Эта модель используется для оценки поведения этих двух компонентов в соединениях, устойчивых к изгибу, которые играют ключевую роль в обеспечении жесткостных характеристик, а также характеристик пластичности соединения. В то же время Т-образная модель остается компактной и простой в реализации.

Простой, но точный метод моделирования фланцевого соединения с эквивалентным Т-образным элементом имеет решающее значение для всей модели соединения, отмечают авторы работ [8,9].

В случае фланцевых соединений, указывают авторы работ [10,11], деформация соединения происходит, в основном, за счет деформации изгибаемых элементов в зоне растяжения, которую можно представить в виде соответствующей Т-образной модели. Область растяжения соединения может быть аппроксимирована Т-образной моделью с соответствующей эффективной длиной, которая учитывает все возможные механизмы текучести как со стороны полки колонны, так и со стороны фланцевой пластины.

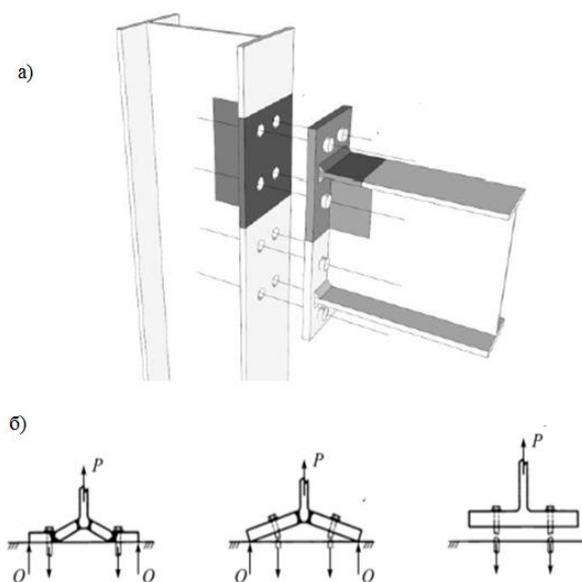


Рис. 1. Расчетная модель фланцевого соединения с применением Т-образных элементов эквивалентной жесткости [7]:

- а) Принципиальная схема расчетной модели фланцевого соединения;
- б) Модель разрушения фланцевого соединения [5]

Если фланцевая пластина имеет высокую изгибную жесткость, разрушение соединения может произойти из-за разрушения болтов. Если изгибная жесткость фланца уменьшается (например, при использовании более тонких элементов), разрушение соединения может произойти из-за разрушения болтов и появления частичных пластических деформаций во фланцевой пластине. Если используются очень тонкие фланцы, разрушение соединения происходит, как правило, из-за развития пластической деформации во фланцевой пластине (Рис. 1б) [5].

Модель работы материала

с применением метода переменных параметров упругости

Гипотеза плоских сечений связана с кинематической картиной деформации при изгибе изотропных материалов. Опыты по пластическому деформированию полосовой стали свидетельствуют о применимости гипотезы плоских сечений для стадии пластичности [12].

Для фланцевой пластины единичной протяженности определяется требуемая область пластических деформаций. Принимая в упругой области сечения линейный закон распределения напряжений, для определения момента внутренних сил M_{ep} в упруго–пластической стадии при образовании пластического шарнира (Рис. 2) получена зависимость:

$$M_{ep} = 2f_y \left[\int_{\frac{z_T}{2}}^{\frac{t}{2}} z dz + \frac{2}{z} \int_0^{\frac{z_T}{2}} z^2 dz \right] = f_y \left(\frac{t^2}{4} - \frac{z_T^2}{12} \right), \quad (1)$$

Для условий работы в упругой и пластической стадии:

$$M_e = 2f_y \left[\frac{2}{z} \int_0^{\frac{t}{2}} z^2 dz \right] = f_y \left(\frac{t^2}{6} \right), \quad (2)$$

$$M_p = 2f_y \left[\int_0^{\frac{t}{2}} z dz \right] = f_y \left(\frac{t^2}{4} \right), \quad (3)$$

Предельный момент для условий работы в стадии деформационного упрочнения:

$$M_{Rd} = f_y \left(\frac{t^2}{4} \right) + \frac{1}{6} (f_u - f_y) t^2, \quad (4)$$

где

f_y – предел текучести стали;

f_u – временное сопротивление;

z – расстояние от элементарных площадок поперечного сечения фланца единичной протяженности до нейтральной оси;

z_T – область упругих деформаций;

t – толщина фланцевой пластины.

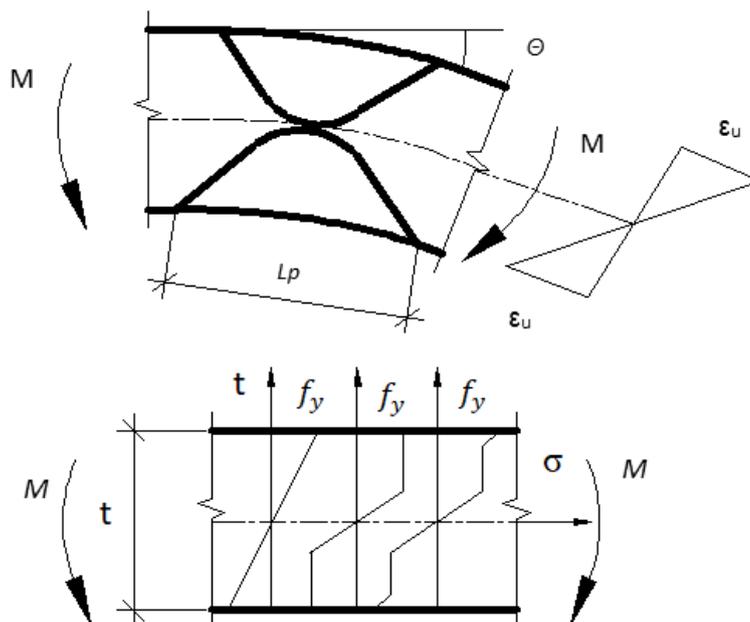


Рис. 2. – Модель пластического шарнира

Метод переменных параметров упругости сводит решение задач деформационной теории пластичности к решению последовательности обычных задач упругости, что существенно облегчает расчеты [12].

Упругая задача первого приближения (материал принимается идеально упругим). Определяются внутренние усилия и деформации:

$$\sigma_{ep}^{n-1} = \frac{m_{ep} z}{J} = \frac{6m_{ep}}{t^2}; \varepsilon_{ep}^{n-1} = \frac{\sigma_{ep}^{n-1}}{E},$$

Во втором и последующих приближениях вносится поправка для секущего модуля, ограничиваясь заданным пределом текучести стали и измененными параметрами упругости системы:

$$E^n = \frac{f_y}{\varepsilon_{ep}^{n-1}}; B^n = \int_0^F z^2 E^n dF; \sigma_{ep}^n = E^n \left\{ \frac{m_{ep} z}{B^n} \right\}; \varepsilon_{ep}^n = \frac{\sigma_{ep}^n}{E^n},$$

(5)

$$E^{n+1} = \frac{f_y}{\varepsilon_{ep}^n}$$

Расчет заканчивается при достаточной близости двух соседних приближений с заданной точностью. Далее определяется коэффициент приведения и значения измененных параметров упругости (для каждой стадии расчета):

$$E^{n+1} = E_{ep} ; \mu_{ep} = \frac{1}{2} - \frac{(1-2\mu)}{2} * \frac{E_{ep}}{E}, \quad (6)$$

где

E_{ep} – секущий модуль упруго–пластической стадии работы;

μ_{ep} – коэффициент Пуассона упруго–пластической стадии работы.

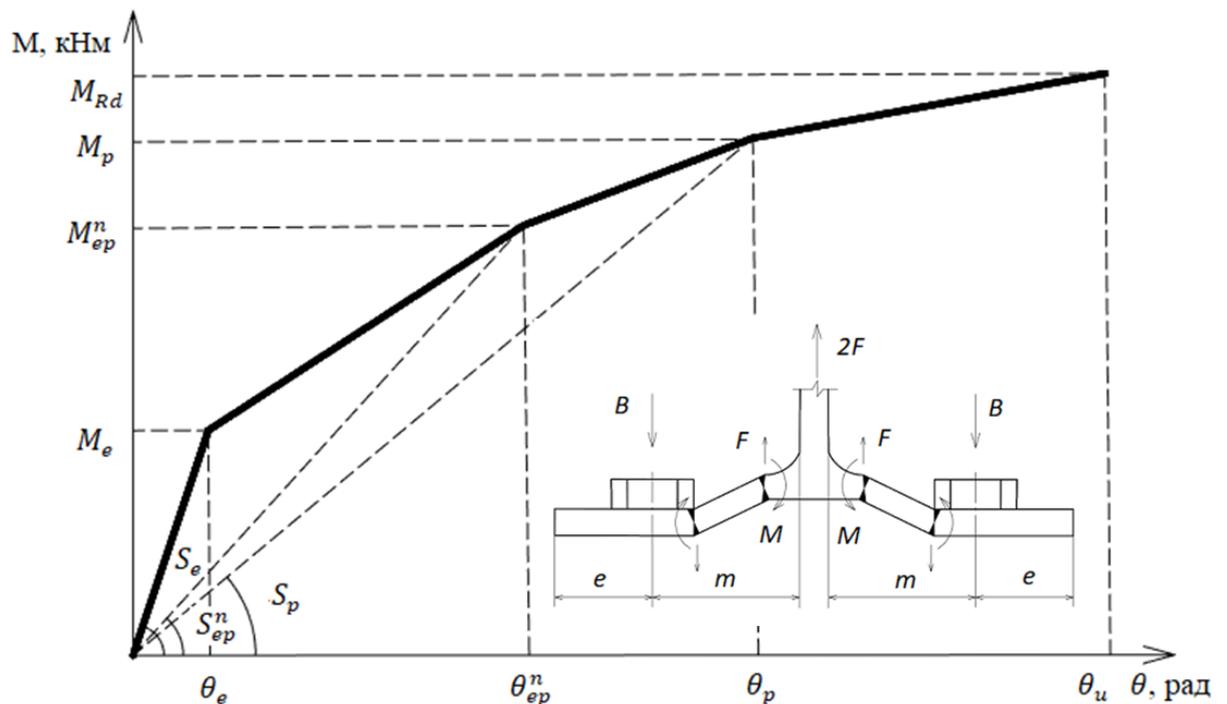


Рис. 3. – Модель эффективной жесткости материала по методу переменных параметров упругости

Для участка элемента, на котором формируется пластический шарнир, его предельная длина может быть определена в соответствии с рекомендациями [13] (Рис. 2). Угол поворота пластического шарнира может быть определен, как:

$$\theta_{ep}^n = \frac{2\Delta L}{t}; = \frac{2\varepsilon_{ep}^n L_p}{t} = \frac{2\varepsilon_{ep}^n m}{10t} = \frac{\varepsilon_{ep}^n m}{5t}, \quad (7)$$

ε_{ep}^n – значение эквивалентной деформации для соответствующей упруго-пластической стадии работы;

m – изгибаемый участок фланцевой пластины между зоной передачи усилия и осью болтового соединения (Рис. 3);

L_p – длина зоны пластических деформаций [13].

На каждом этапе изменения напряженно-деформированного состояния могут быть определены модифицированные параметры упругости, линейные и угловые деформации. Модель эффективной жесткости материала в виде диаграммы «момент – угол поворота « $M-\theta$ » сечения фланцевой пластины в зоне пластических деформаций представлена на Рис. 3.

Модель компонента «фланцевая пластина»

с применением метода переменных параметров упругости

Изначально фланцевое соединение представляет собой сложную для анализа конструкцию, поскольку его работа выполняется по пространственной схеме и включает в себя контактные взаимодействия между пластиной и болтами. Чтобы упростить модель, необходимо пойти на некоторые допущения. В расчётной модели, показанной на Рис. 4, используется классическая теория балок. Расстояние от кромки фланца до оси болта считается потенциальной зоной контакта.

Уравнения равновесия на каждом этапе изменения напряженно-деформированного состояния могут быть записаны в виде:

$$M^j - F^j m + Q^j e = 0; M^j - F^j m + \alpha M^j = 0, \quad (8)$$

$$F^j + Q^j - B^j = 0; Q^j e - \alpha M^j = 0; \frac{Q^j}{F^j} \approx \frac{3m}{8e}, \quad (9)$$

где

F^j – внешняя нагрузка на каждой стадии работы элемента;

M^i – изгибающий момент в сечении фланцевой пластины для соответствующей стадии работы;

Q^i – рычажное усилие в сечении фланцевой пластины для соответствующей стадии работы;

B^i – усилие в болтовом соединении для соответствующей стадии работы;

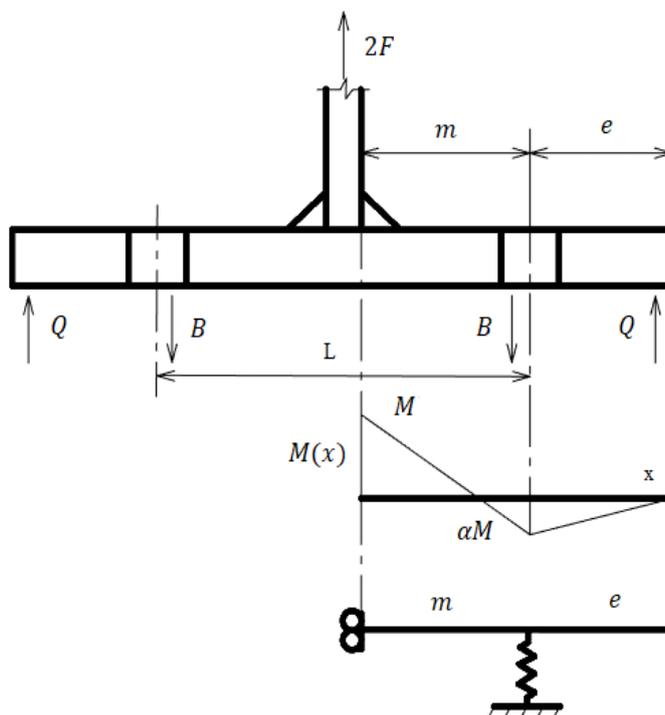


Рис. 4. – Расчетная модель изгибаемой фланцевой пластины с применением эквивалентного Т-образного элемента

На каждом этапе выполняется проверка несущей способности болтового соединения:

$$B_i \leq B_{Rd} = 0,7 A_{bn} R_{bun},$$

Классическая расчетная схема эквивалентного элемента изгибаемой фланцевой пластины во многих случаях сложно поддается расчету с помощью уравнений статического равновесия из-за трудностей, связанных с определением граничных условий. Предлагаемый метод моделирования использует принцип разделения Т-образного сечения на несколько

элементарных участков, что позволит получить решение в допустимо упрощенной форме. Принципиальная схема представлена на Рис. 5.

Выполняется расчет изгибаемого участка между зоной передачи усилия и осью болтового соединения. Задача определения напряженно-деформированного состояния решается с использованием дифференциального уравнения изогнутой оси рассматриваемого элементарного участка. Поскольку расчетная модель предполагает образование пластических шарниров по краям элемента, что влечет изменение граничных условий, задача решается относительно двух независимых участков $0 \leq x_1 \leq m/2$; $0 \leq x_2 \leq m/2$.

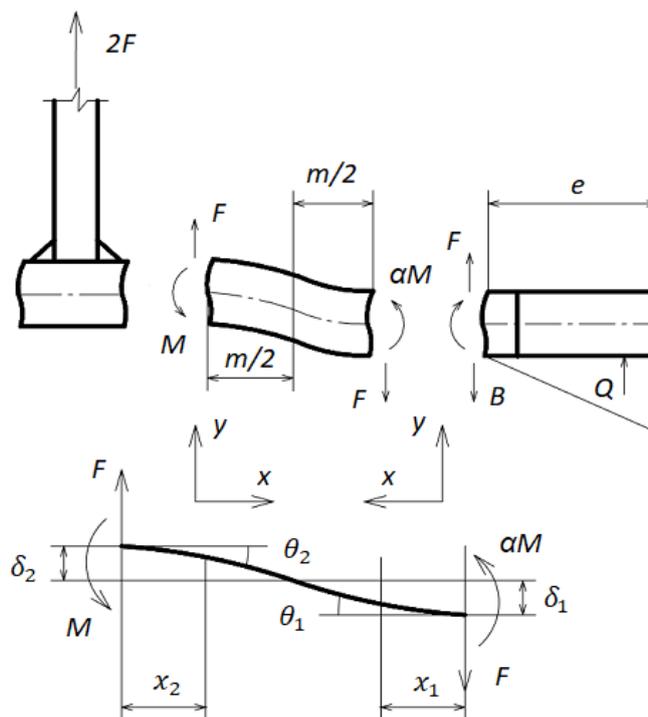


Рис. 5. – Расчетная модель эквивалентного Т-образного элемента с разбиением на элементарные участки

В результате определяется угол поворота опорного сечения для рассматриваемых участков:

$$\theta_1 = \frac{1}{EJ} \left[F^j \left(mx_1 - \frac{x_1^2}{2} \right) - M^j x_1 + C_1 \right],$$

$$\theta_2 = \frac{1}{EJ} \left[F^j \left(\frac{x_2^2}{2} - mx_2 \right) + \alpha M^j x_2 + C_2 \right],$$

Перемещения для рассматриваемых участков:

$$\delta_1 = \frac{1}{EJ} \left[F^j \left(m \frac{x_1^2}{2} - \frac{x_1^3}{6} \right) - M^j \frac{x_1^2}{2} + C_1 x_1 + D_1 \right]$$

$$\delta_2 = \frac{1}{EJ} \left[F^j \left(\frac{x_2^3}{6} - m \frac{x_2^2}{2} \right) + \alpha M^j \frac{x_2^2}{2} + C_2 x_2 + D_2 \right]$$

Далее рассматриваются три варианта расчетной модели элементарного участка:

Вариант 1. Упругая работа.

После определения граничных условий и постоянных интегрирования, а также параметров фланцевой пластины, решение для перемещений принимает вид:

$$\delta_e = \delta_1 + |\delta_2| = \frac{1}{EJ} \left[\frac{1}{48} F^j m^3 + \frac{3}{48} F^j m^3 \right] = \frac{1}{EJ} \left[\frac{1}{12} F^j m^3 \right] = \frac{F^j m^3}{ELt^3}, \quad (10)$$

Вариант 2. Формирование пластического шарнира в средней зоне фланцевой пластины (упруго-пластическая работа).

При формировании пластического шарнира в средней зоне фланцевой пластины:

$$y_2' = -\theta_{ep2} = \frac{1}{EJ} \{C_2\},$$

Проведя преобразования и воспользовавшись формулой (7):

$$C_2 = -\frac{2\varepsilon_{ep}^n m EJ}{10t},$$

Решение для деформаций принимает вид:

$$\delta_{ep} = \delta_1 + |\delta_2| = \frac{1}{EJ} \left[\frac{1}{12} F^j m^3 + \frac{\varepsilon_{ep}^n m^2 EJ}{10t} \right] = \frac{F^j m^3}{ELt^3} + \frac{\varepsilon_{ep}^n m^2}{10t}, \quad (11)$$

Изменение момента в зоне пластических деформаций, вызванное податливостью узла, составляет:

$$\theta = \frac{\Delta M dx}{EJ}; \Delta M = d\theta \frac{EJ}{m} = (\theta_{ep}^j - \theta_e^j) \frac{EJ}{m} \left(1 - \frac{1}{\gamma_{ep}^j}\right); M^j - \Delta M; \alpha M^j + \Delta M, \quad (12)$$

Вариант 3. Формирование пластического шарнира в средней зоне фланцевой пластины и в зоне расположения болтов (пластическая работа).

При формировании пластического шарнира в зоне расположения болтов:

$$y_1' = \theta_{ep1} = \frac{1}{EJ} \{C_1\},$$

Проведя преобразования и воспользовавшись формулой (7):

$$C_1 = \frac{2\varepsilon_{ep1}^n m EJ}{10t},$$

При формировании пластического шарнира в средней зоне фланцевой пластины:

$$y_2' = -\theta_{ep2} = \frac{1}{EJ} \{C_2\}; C_2 = -\frac{2\varepsilon_{ep2}^n m EJ}{10t}$$

Решение для деформаций принимает вид

$$\delta_{pp} = \delta_1 + |\delta_2| = \frac{1}{EJ} \left[\frac{1}{12} F^j m^3 + \frac{\varepsilon_{ep1}^n m^2 EJ}{10t} + \frac{\varepsilon_{ep2}^n m^2 EJ}{10t} \right] = \frac{F^j m^3}{ELt^3} + \frac{m^2}{10t} (\varepsilon_{ep1}^n + \varepsilon_{ep2}^n), \quad (13)$$

Изменение момента в зоне образования пластических шарниров, вызванное податливостью узла, составляет:

$$\theta = \frac{\Delta M dx}{EJ}; \Delta M = d\theta \frac{EJ}{m} = (\theta_{ep}^j - \theta_e^j) \frac{EJ}{m} \left(1 - \frac{1}{\gamma_{ep}^j}\right); M^j - \Delta M; \alpha M^j + \Delta M, \quad (14)$$

В соответствии с концепцией Еврокод 3 модель может быть представлена элементом растяжения с упругой реакцией, выраженной зависимостью «усилие – деформация» «F-δ». При моделировании работы компонента «фланцевая пластина» за основу была принята модель упруго-пластического тела с линейным упрочнением [14]. По аналогии с данной моделью, а также в соответствии с формулами (10, 11, 13), параметры жесткости приняты:

для упругой стадии работы:

$$K_{fle} = \frac{ELt^3}{m^3} \approx \frac{(0,85L_{eff})Et^3}{m^3}, \quad (15)$$

для упруго-пластической стадии работы:

$$K_{flep}^n = \frac{F^j}{\left(\delta_e^j + \frac{\varepsilon_{ep}^n m^2}{10t}\right)}, \quad (16)$$

для пластической стадии работы:

$$K_{flep}^n = \frac{F^j}{\left[\delta_e^j + \frac{m^2}{10t} (\varepsilon_{ep1}^n + \varepsilon_{ep2}^n)\right]}, \quad (17)$$

F^j – внешняя нагрузка на каждой стадии работы элемента.

Решая задачу с использованием принципа минимума потенциальной энергии и проведя соответствующие преобразования, решение для параметров жесткости принимает вид:

для упруго-пластической стадии работы:

$$K_{flep}^n = \frac{F^j}{\Delta^j} = \left(\frac{1}{k_{fle}} + \frac{1}{k_{flep}^n}\right)^{-1}; k_{fle} = \frac{F^j}{\delta_e^j}; k_{flep}^n = \frac{F^j}{\left(\frac{\varepsilon_{ep}^n m^2}{10t}\right)},$$

для пластической стадии работы:

$$K_{flp}^n = \frac{F^j}{\Delta^j} = \left(\frac{1}{k_{fle}} + \frac{1}{k_{flp}^n} \right)^{-1}; \quad k_{fle} = \frac{F^j}{\delta_e^j}; \quad k_{flp}^n = \frac{F^j}{\left(\frac{m^2}{10t} (\varepsilon_{ep1}^n + \varepsilon_{ep2}^n) \right)},$$

k_{fle} – коэффициент жесткости упругой составляющей для компонента «фланцевая пластина»;

k_{flp}^n – коэффициент жесткости упруго–пластической составляющей для компонента «фланцевая пластина»;

k_{flp}^n – коэффициент жесткости пластической составляющей для компонента «фланцевая пластина»;

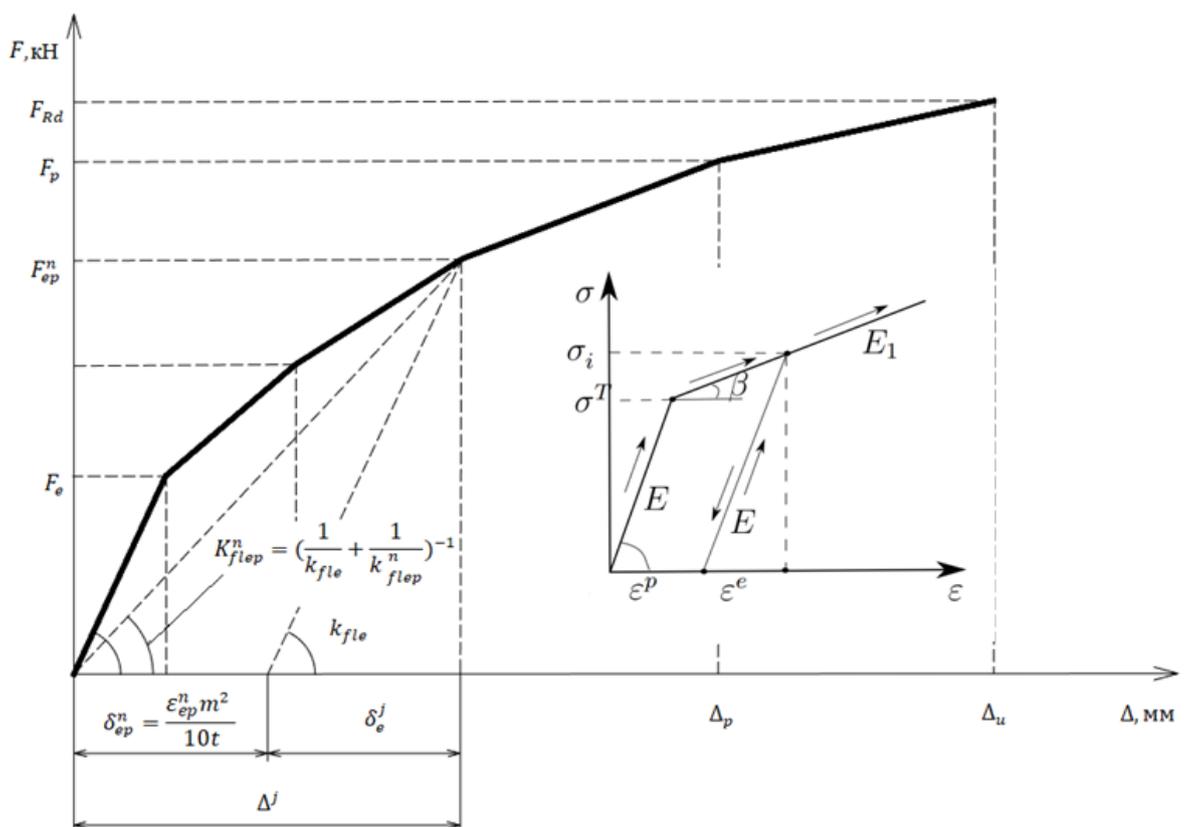


Рис. 6. – Диаграмма «усилие – деформация «F-δ» эквивалентного Т–элемента с применением метода переменных параметров упругости

Модель работы на изгиб фланцевой пластины с использованием метода переменных параметров упругости может быть представлена системой

последовательно соединенных пружин упругой и пластической стадии работы (Рис. 6).

Результаты

За основу для проведения численного эксперимента были приняты результаты испытаний фланцевых соединений, выполненных Сиднейским Университетом (USYD). Данные результатов испытаний подробно изложены в работе [15].

Тестовая серия состояла из 13 испытаний фланцевых пластин толщиной 10 и 20 мм. Часть испытаний состояла из серии для соединений с фланцевыми пластинами толщиной 10 мм и 20 мм, которые были подвергнуты изгибу относительно главной оси соединения (S 10_0_0_V, S20_0_0_V). Эта серия испытаний представляется наиболее благоприятной для выполнения теоретической оценки. При проведении эксперимента применялись элементы из проката 310UB 46,2 для моделирования балочной конструкции и элементы из проката 310UC 96,8 для моделирования участка колонны. Параметры фланцевой пластины соединения при проведении испытаний приведены на Рис. 7.



Рис. 7. – Параметры фланцевой пластины соединения при проведении испытаний [15]

Основные параметры испытаний приведены в Таблице №1. Механические свойства компонентов узла, подвергнутого испытаниям, приведены в Таблице №2. Параметры проката приведены в Таблице №3.

Таблица №1

Параметры испытаний

Наименование	Фланцевая пластина	Отказавший компонент	Условия нагрузки
S20_0_0_B	20 мм	Стенка колонны	Изгиб в главной плоскости

Таблица №2

Механические свойства компонентов (МПа)

Тест	Фланцевая пластина		Колонна		Балка		Болт	
	fy	fu	fy	fu	fy	fu	ø	К.п.
S20_0_0_B	429	556	396	512	396	512	M24	8.8

Таблица №3

Параметры проката (мм)

Элемент	Профиль	wf	h	tf	tw	r
Балка	310 UB	166,0	307,0	11,80	6,70	11,40
	46.2					
Колонна	310 UB	305,0	305,0	15,40	9,90	16,50
	96.8					

Испытательный стенд состоял из гидравлического домкрата с грузоподъемностью 1000 кН и перемещением 250 мм. Домкрат был соединен с жесткой рамой с возможностью регулировки. Гидравлический домкрат соединялся с зоной нагрузки испытуемого образца стальным рычагом. Схема испытательного стенда представлена на Рис. 8.

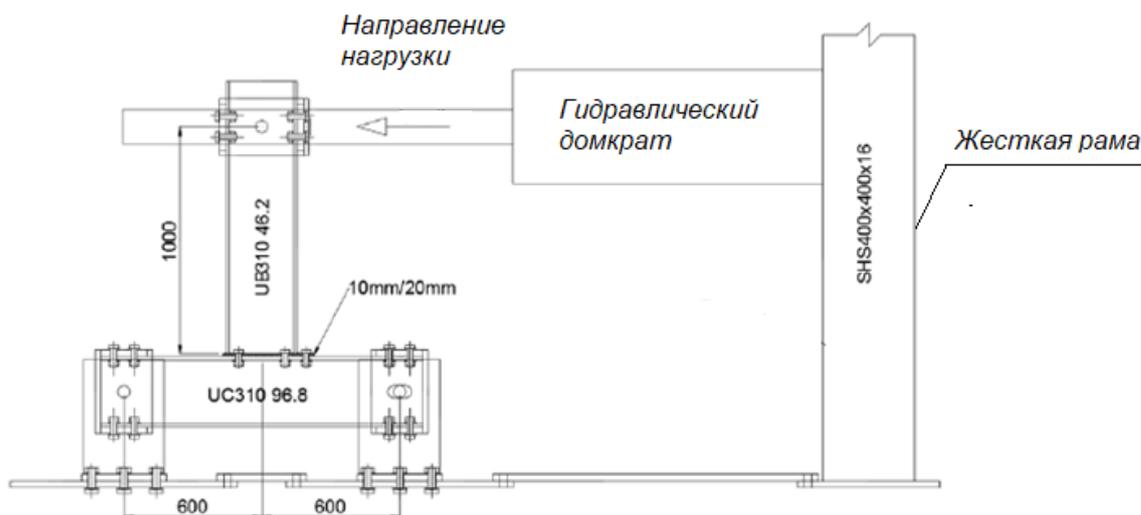


Рис. 8. – Схема испытательного стенда [15]

Колонна располагалась в горизонтальном положении, была закреплена на двух шарнирных опорах, установленных на опорные элементы. Один конец балочного элемента, расположенного по вертикали, присоединен через фланцевое соединение к полке колонны. Другой конец балочного элемента нагружался в горизонтальном направлении. Схема модели выбрана таким образом, чтобы деформациями от изгиба и сдвига ее элементов можно было пренебречь. Изгиб фланцевой пластины был получен с помощью показаний датчика. Приложенный момент и угол поворота рассчитывались на основе измерений тензодатчика в гидравлическом домкрате, датчика перемещения и инклинометра, прикрепленного к нагрузочному рычагу.

Проверка аналитической модели изгиба фланцевой пластины

Моделирование работы на изгиб фланцевой пластины выполнено для внутреннего ряда болтов под растянутой полкой балки (Рис. 9) с применением модели эквивалентного Т-образного элемента.

Эффективная длина определена в соответствии с рекомендациями (EN 1993-1-8. Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 1.8: Design of Joints. CEN Brussels, Belgium. 2005) путем установления равнозначности условий разрушения материала между балочной моделью и фактическим поведением

фланцевой пластины в момент разрушения из-за формирования механизма текучести. Параметры модели определялись в зависимости от геометрических параметров соединения и представлены в Таблице №4. Аналитическая модель была разработана для фланцевой пластины толщиной 10, 12, 16 и 20 мм.

Таблица №4

Параметры модели (мм)

Параметры модели t_{fl}/L_{eff}	t_{fl} мм	L_{eff} мм	m мм	e_{ep} мм	w мм	$\frac{w}{t_{fl}}$
10x240	10	240	61,7	65	140	14,00
12x240	12	240	61,7	65	140	11,67
16x240	16	240	61,7	65	140	8,75
20x240	20	240	61,7	65	140	7,0

На первой стадии расчета задавалась модель работы материала. Определялись внутренние усилия для каждой стадии работы элемента в соответствии с формулами (1 – 4). Определялись модифицированные параметры упругости в соответствии с формулами (5, 6).

На втором этапе определялись внешние воздействия, соответствующие каждой стадии работы элемента в соответствии с формулами (8, 9).

Далее формировалась модель изменения напряженно-деформированного состояния элемента с пошаговым приращением нагрузки по одному из трех вариантов расчетной модели изгибаемой фланцевой пластины. Параметры жесткости модели на каждом этапе нагружения определялись в соответствии с формулами (15 – 17).

В Таблице №5 приведены данные расчета методом переменных параметров упругости, выполненного для фланцевой пластины толщиной 12 мм.

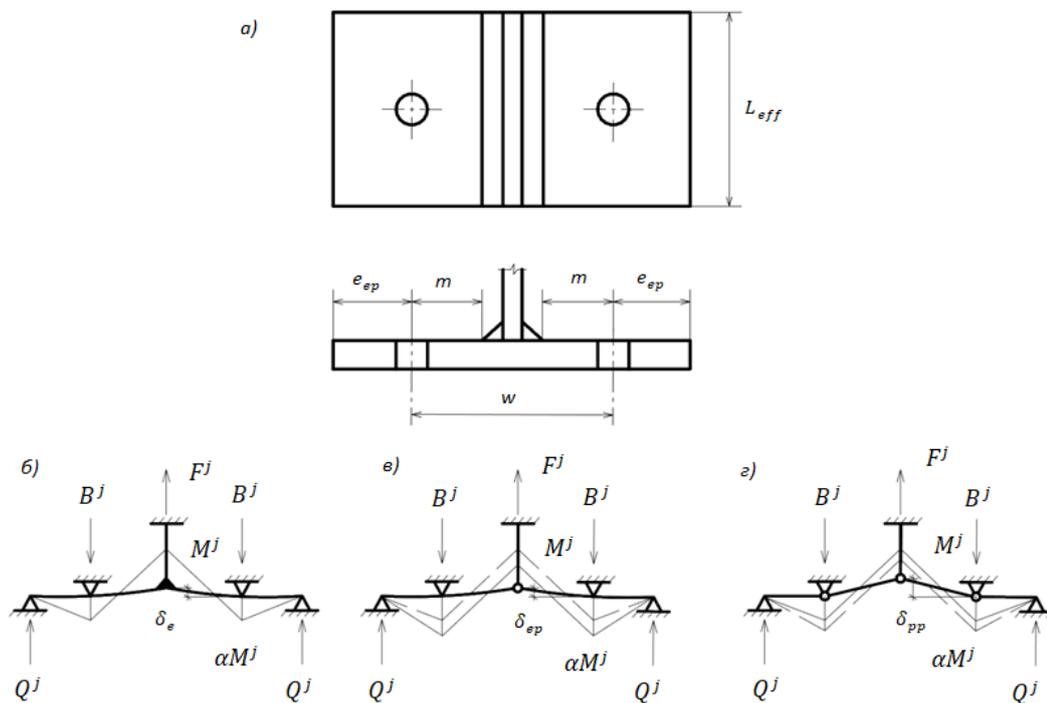


Рис. 9. – Расчетная модель эквивалентного Т– образного элемента метода переменных параметров упругости; а) Принципиальная схема расчетной модели фланцевого соединения; б) Вариант 1 – упругая работа; в) Вариант 2 – формирование пластического шарнира в центральной зоне фланца; г) Вариант 3 – формирование пластических шарниров в центральной зоне фланца и в зоне расположения болтов

Таблица №5

Данные расчета методом переменных параметров упругости

Вариант Расчетной модели	M^j кНм	αM^j кНм	F^j кН	δ_e^j мм	δ_{ep}^j мм	Δ^j мм	K^j кН/мм	μ	E_p кДж
Вариант 1	2,452	1,177	105	0,43	-	0,43	244,0	7,67	0,615
Вариант 2	2,649	1,668	122	0,50	0,20	0,70	174,0		
Вариант 2	3,041	2,158	147	0,60	0,27	0,87	169,0		
Вариант 2	3,340	2,159	160	0,64	0,31	0,95	168,0		
Вариант 3	3,924	2,747	189	0,75	0,65	1,40	135,0		
Вариант 3	4,807	3,434	235	0,95	1,14	2,09	112,0		
Вариант 3	5,886	4,415	294	1,18	1,8	2,98	99,0		

Для проведения численного эксперимента применялся вычислительный комплекс для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов SCAD Office 21.1.9.5. Применяемый материал, за исключением изгибаемой фланцевой пластины, моделировался линейно упругим. Тип конечного элемента 5. Изгибаемая фланцевая пластина принята толщиной 10, 12, 16 и 20 мм с характеристиками упруго – пластического материала. Тип конечного элемента 405. Для фланцевой пластины использовалась билинейная модель напряженно – деформированного состояния материала с аппроксимацией Паде билинейной диаграммы (Рис. 10).

Механические свойства материала: сталь AS 350, предел текучести $f_y = 429$ МПа, предел прочности при растяжении $f_u = 556$ МПа, относительная деформация, соответствующая пределу прочности $\varepsilon_u = 0,1$.

Для упрощения расчета податливость болтовых соединений не учитывалась. Условия контакта в зоне расположения болтов и по краям фланцевой пластины задавались шарнирными связями без смещения, но с возможностью поворота сечения пластины.

Для решения задачи расчет выполнен в нелинейной постановке с последовательным пошаговым приложением нагрузки.

В Таблице №6 приведены данные расчета фланцевой пластины толщиной 12 мм, выполненные с применением МКЭ в вычислительном комплексе SCAD office.

На основании аналитической модели метода переменных параметров упругости и расчета с применением МКЭ построена диаграмма работы «усилие–деформация «F–d» элементов толщиной 10, 12, 16 и 20 мм. Диаграммы представлены на Рис. 11. Диаграммы демонстрируют хорошую сходимость аналитической модели с данными численного эксперимента.

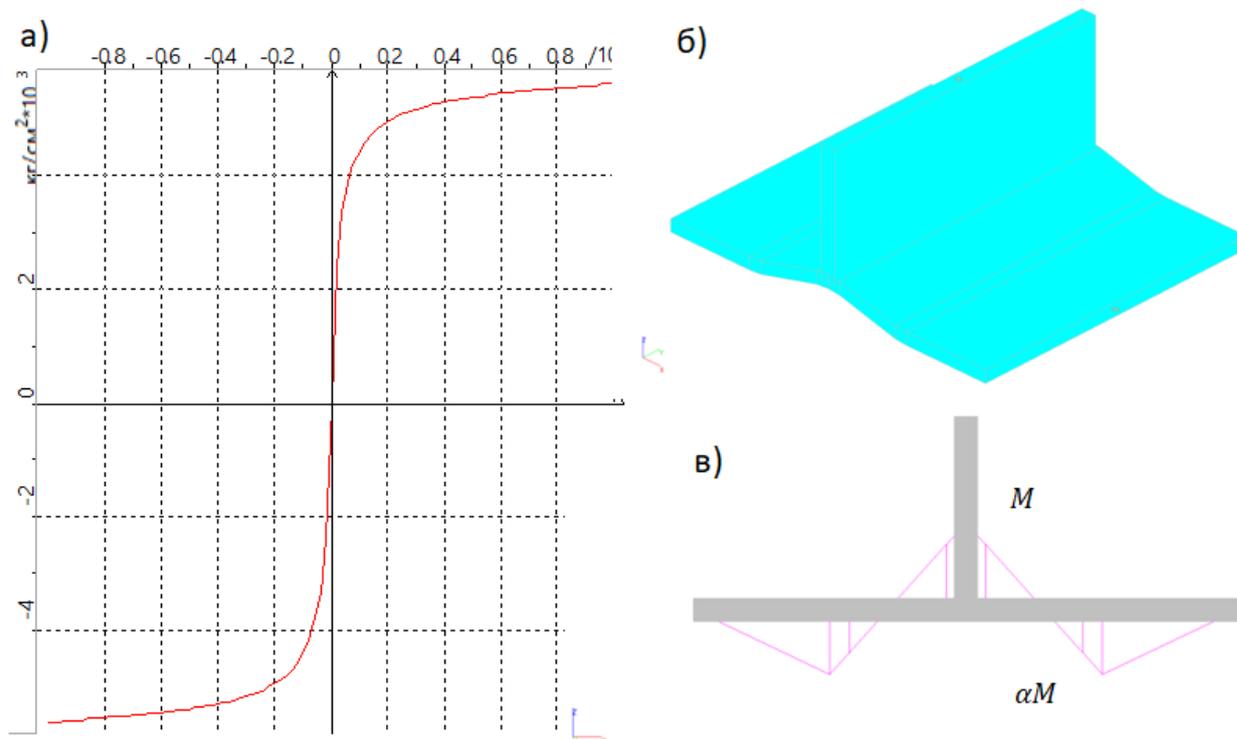


Рис. 10. – Расчетная модель эквивалентного Т-образного элемента МКЭ

- а) Модель напряженно–деформированного состояния материала; б) Расчетная модель Т-образного элемента МКЭ; в) Эпюра изгибающего момента $M(x)$ для фланца МКЭ.

Таблица №6

Данные расчета методом МКЭ фланцевой пластины толщиной 12 мм

M^j кНм	αM^j кНм	F^j кН	δ^j мм	K^j кН/мм	μ	E_p кДж
1,570	1,177	108	0,34	317,0	9,06	0,541
2,354	1,668	122	0,54	225,0		
2,845	2,060	144	0,74	195,0		
3,041	2,260	152	0,84	181,0		
3,335	2,550	172	1,06	162,0		
3,826	3,041	196	1,45	135,0		
4,610	4,120	255	3,08	83,0		

Благодаря тому, что толщина фланцевых пластин, примененных в модели, гарантировала переход конструкции в пластическую стадию работы до

разрушения болтов, модель показала наличие различных возможных режимов разрушения. Все четыре модели продемонстрировали постепенный переход от упругой к пластической стадии работы, с образованием пластического механизма в нескольких зонах фланцевой пластины по «Варианту 3» расчетной модели.

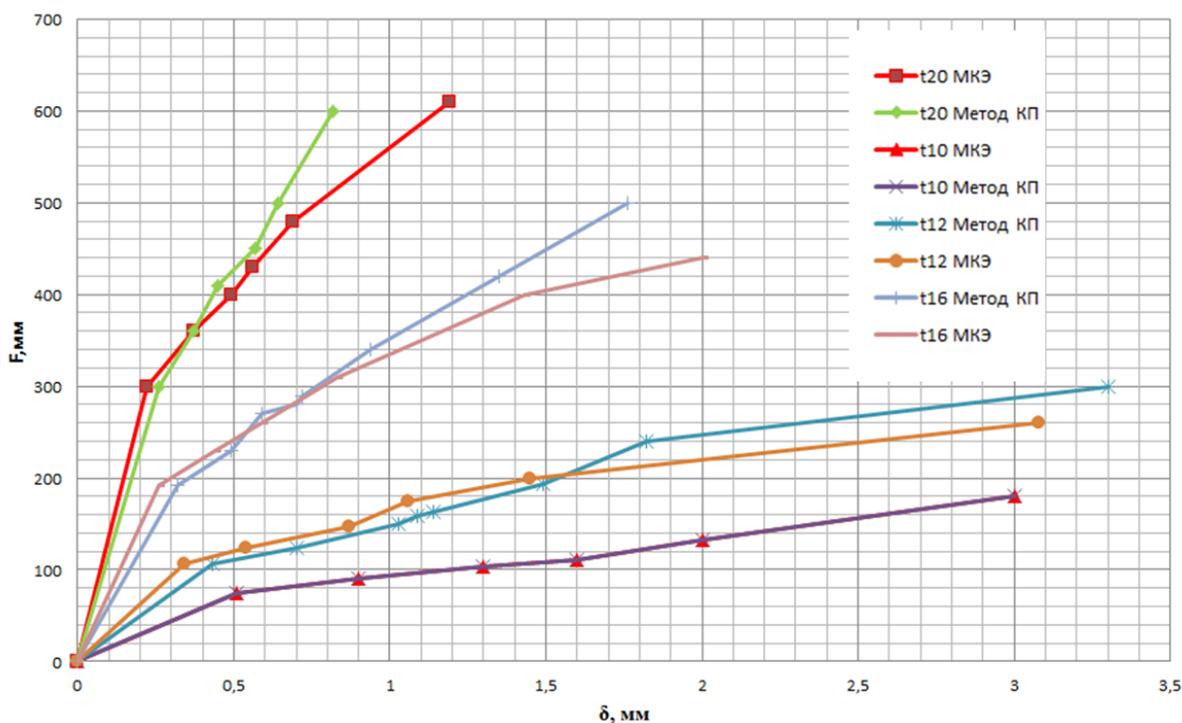


Рис. 11. – Диаграмма «усилие – деформация F–d» работающей на изгиб фланцевой пластины

Возможность конструкции менять форму, при этом не теряя своих прочностных характеристик и не разрушаясь, является важным параметром, который характеризуется пластичностью, а также, способностью конструкции безопасно поглощать и распределять энергию.

Общая суммарная поглощенная энергия до выхода из строя элемента соединения определялась по формуле:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_2^n (F^j + F^{j-1}) (\Delta^j - \Delta^{j-1}) ,$$

где:

Δ^j – деформация элемента на каждой стадии работы;

F^j – внешняя нагрузка на каждой стадии работы.

Параметры пластичности и энергопоглощающей способности для рассмотренных моделей приведены в Таблице №7.

Таблица №7

Параметры пластичности и энергопоглощающей способности модели

Параметры модели tfl /Leff	μ	E_p кДж
10x240	5,88	0,308
12x240	7,67	0,615
16x240	5,5	0,510
20x240	4,3	0,455

E_p – общая суммарная поглощенная энергия до выхода из строя элемента соединения;

μ – параметр пластичности;

Образец с толщиной стенки 12 мм продемонстрировал наилучшие показатели в данном наборе данных, превзойдя все остальные образцы не менее чем на 39% по показателю пластичности, а также не менее чем на 20% по показателю энергопоглощающей способности.

Уточненная компонентная модель

с применением метода переменных параметров упругости

Принципиальная расчетная схема уточненной компонентной модели представлена на рис. 12.

В результате решения задачи с использованием принципа минимума потенциальной энергии и проведения соответствующих преобразований, решение для модели жесткости системы принимает вид:

$$S^j = \frac{M^j}{\theta^j} = \frac{z^2}{(K_t^j + K_c^j) / K_t^j K_c^j} = \frac{z^2}{\left[\frac{1}{K_t^j} + \frac{1}{K_c^j} \right]}, \quad (16)$$

где:

K_t^j – жесткость растянутой зоны соединения j -той стадии;

K_c^j – жесткость сжатой зоны соединения j -той стадии;

M^j – внешний изгибающий момент j -той стадии.

Параметры жесткости компонентов сжатой зоны:

В упругой стадии работы:

$$K_{ec}^j = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_{eci}} \right)^{-1},$$

В пластической стадии работы:

$$K_{pc}^j = \left(\sum_{i=1}^{n-m} \frac{1}{k_{eci}} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{k_{pci}} \right)^{-1},$$

где:

n – число компонентов сжатой зоны;

m – число компонентов сжатой зоны в пластической стадии работы;

k_{eci} – коэффициенты жесткости компонентов в упругой стадии работы в соответствии с рекомендациями (EN 1993-1-8. Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 1.8: Design of Joints. CEN Brussels, Belgium. 2005);

k_{pci} – коэффициенты жесткости компонентов в пластической стадии работы в соответствии с методикой [15].

В растянутой зоне фланцевого соединения эквивалентный коэффициент жесткости определяется по формулам:

$$K_t^j = \frac{\sum K_{ii}^j h_{ri}}{z}; \quad z = \frac{\sum K_{ii}^j h_{ri}^2}{\sum K_{ii}^j h_{ri}},$$

z — эквивалентное плечо внутренней пары сил.

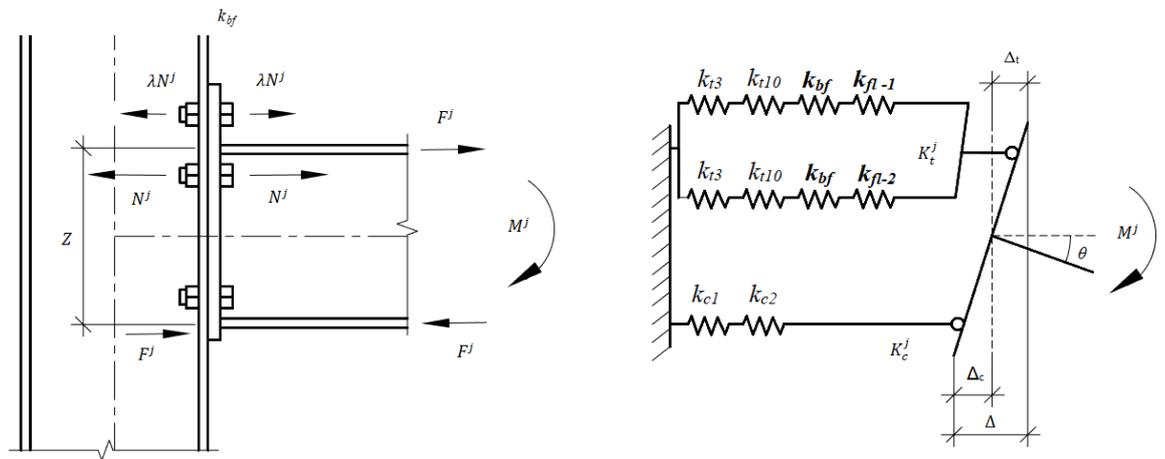


Рис. 12. – Уточненная компонентная модель

Параметры жесткости определялись по формулам:

В упругой стадии:

$$K_{tei}^j = \left(\sum_{i=1}^{r-1} \frac{1}{k_{eti}} + \frac{1}{k_{flei}} \right)^{-1},$$

В упруго-пластической стадии:

$$K_{теpi}^j = \left(\sum_{i=1}^{r-1} \frac{1}{k_{eti}} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{k_{pti}} + \frac{1}{k_{flei}} + \frac{1}{k_{flepi}^n} \right)^{-1},$$

В пластической стадии:

$$K_{tpi}^j = \left(\sum_{i=1}^{r-1} \frac{1}{k_{eti}} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{k_{pti}} + \frac{1}{k_{flei}} + \frac{1}{k_{flepi}^n} \right)^{-1},$$

где:

r – число компонентов растянутой зоны;

m – число компонентов растянутой зоны в пластической стадии работы;

k_{eti} – коэффициенты жесткости компонентов в упругой стадии в соответствии с рекомендациями (EN 1993-1-8. Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 1.8: Design of Joints. CEN Brussels, Belgium. 2005);

k_{pti} – коэффициенты жесткости компонентов в пластической стадии в соответствии с методикой [15].

Полка колонны имеет планки усиления толщиной 20 мм, что учитывалось при создании модели. Фланцевая пластина узла S20_0_0_V принята толщиной 20 мм. Модель работы на изгиб фланцевой пластины узла S20_0_0_V выполнена в виде эквивалентного элемента внутренней зоны, расположенной под растянутой полкой балки, и эквивалентного элемента внешней зоны, расположенной над растянутой полкой балки. Моделирование работы на изгиб участка полки колонны для узла S20_0_0_V выполнено в виде эквивалентного элемента внешней зоны (Рис. 9). При моделировании работы узла на поворот также была учтена жесткость балочной конструкции из проката 310UB 46,2 и участка колонны из проката 310UC 96,8.

Результаты расчета аналитической модели фланцевого соединения узла S20_0_0_V отражены на диаграмме «момент – угол поворота $M-\theta$ » (Рис. 13). Также на диаграмме представлены результаты испытаний фланцевого соединения S20_0_0_V, выполненного Сиднейским Университетом (USYD) [15], и результаты численного моделирования с применением программного комплекса инженерного моделирования ANSYS.

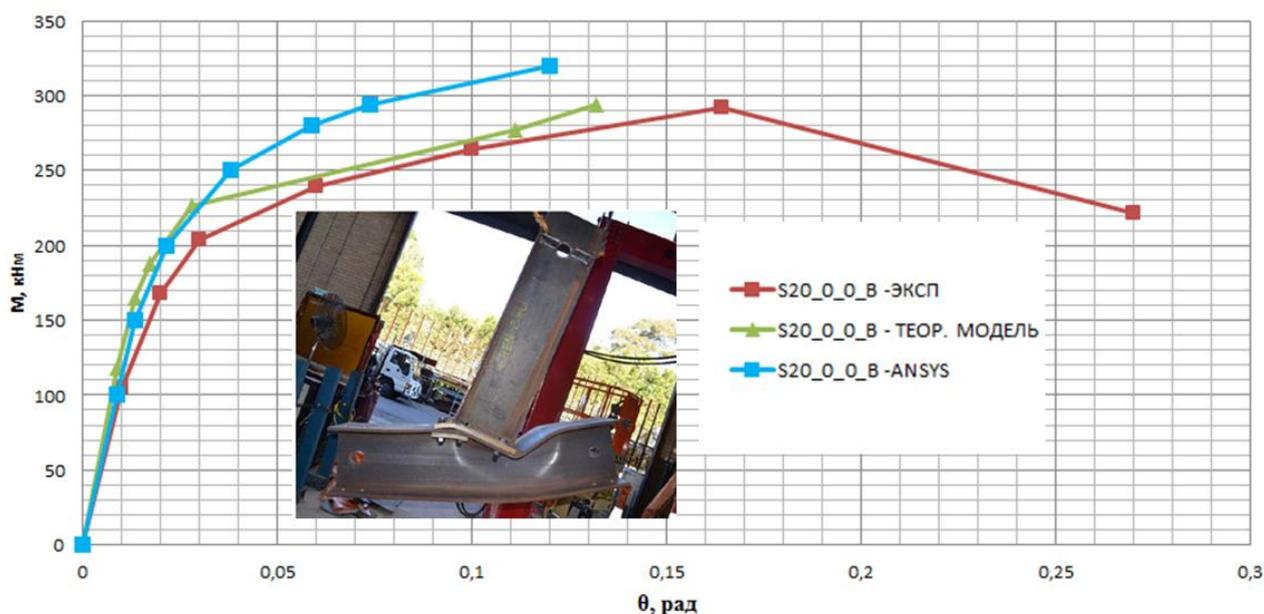


Рис. 13. – Диаграмма «момент – угол поворота $M-\theta$ » узла S20_0_0_V

Как видно из диаграммы, по мере увеличения нагрузки соединение начинает демонстрировать нелинейное снижение жесткости, график зависимости, как по экспериментальным данным, так и согласно аналитической модели, стремится к переходу в плавную кривую до момента потери устойчивости стенки колонны. Далее, согласно аналитической модели, жесткость соединения начинает стремительно снижаться. Эксперимент S20_0_0_V достиг своего максимального момента в 292,3 кНм при угле поворота 0,164 рад [15]. При расчете по методу переменных параметров упругости, максимальный момент 294 кНм был достигнут при угле поворота 0,132 рад.

График зависимости «момент – угол поворота « $M-\theta$ » предлагаемой аналитической модели хорошо согласуется с экспериментальными данными. Вместе с тем, имеется расхождение экспериментальных данных с предлагаемой методикой расчета. В упруго–пластической стадии работы погрешность составила порядка 13%.

Описание численной модели с применением программного комплекса инженерного моделирования ANSYS

Как указывается в работе [15], только два результата испытаний (S20_0_0_V и S20_34_0_V) с толщиной пластины 20 мм оказались непосредственно сопоставимы с теоретической моделью во всем диапазоне нагрузок. Основываясь на этих данных, для проверки аналитической модели и проведения численного эксперимента были приняты результаты, полученные при испытаниях соединения с фланцевой пластиной толщиной 20 мм (S20_0_0_V), с изгибом относительно главной оси соединения.

Численный эксперимент по моделированию узла примыкания балки к колонне S20_0_0_V выполнен с помощью вычислительного комплекса Ansys Workbench. Геометрия математической модели выполнена в графической программе SolidWorks (Рис. 14). Модель состоит из твердотельных

элементов: болтов, фрагмента балки, фрагмента колонны, фланцевой пластины, ребер жесткости. Примыкания отдельных элементов описаны с помощью типов контактов Bonded и Frictional. Тип контакта Bonded представляет собой полное сцепление поверхностей, используется в местах контакта сварных швов. Тип Frictional (контакт с трением) применяется во всех остальных контактируемых телах. Коэффициент трения принят 0,3. Для задания материала болтов использовалась билинейная диаграмма Прандтля с временным сопротивлением 1100 МПа.

Для детального описания пластического поведения элементов конструкции применялся материал Structural Steel NL в виде билинейной диаграммы с деформационным упрочнением. Данные материалы приведены в Таблице №8. Выполнялся физически и геометрически нелинейный расчет с пошаговым приращением нагрузки. Изначально заложено 10 шагов.

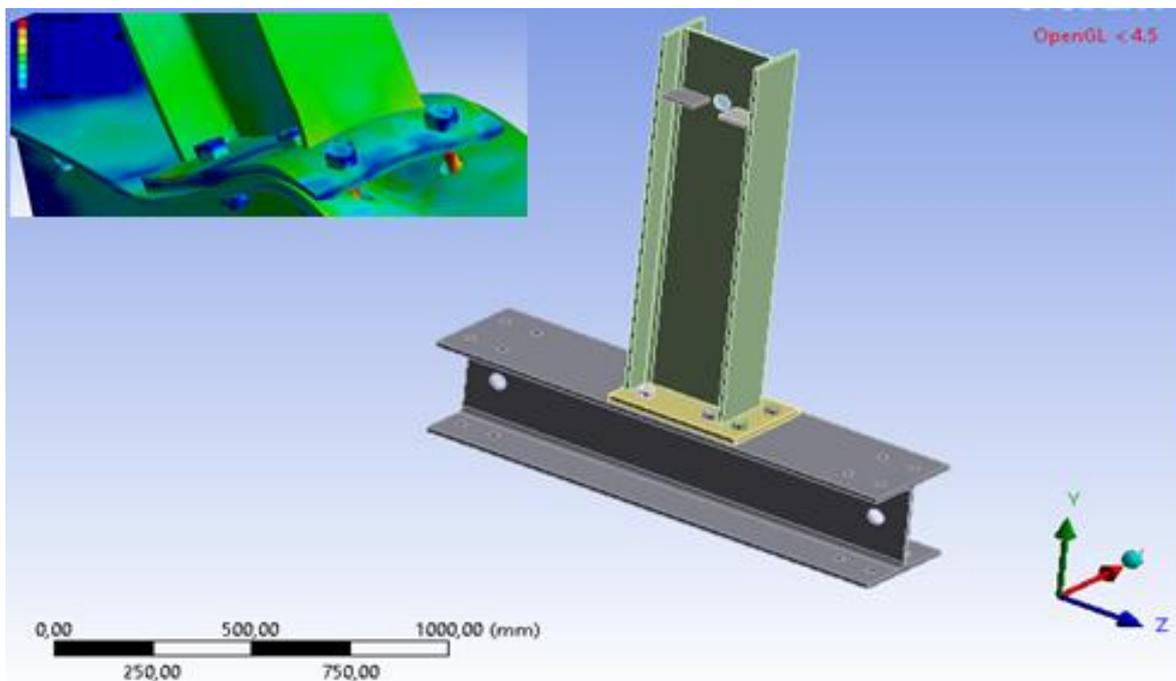


Рис. 14. – Геометрия численной модели

На каждом этапе нагружения выполнялся контроль прикладываемой нагрузки, усилий в болтовом соединении, перемещения конца консоли в виде балочного элемента, перемещений зон фланцевой пластины в районе

растянутой полки балочного элемента, а также у края фланцевой пластины, кроме того, выполнялся контроль перемещений в сжатой зоне фланцевой пластины.

Таблица №8

Данные материала Structural Steel NL

	Density	7,85e-006 kg mm ⁻³
	Specific Heat	4,34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹
	Young's Modulus, MPa	2,e+005
	Poisson's Ratio	0,3
	Bulk Modulus, MPa	1,6667e+005
	Shear Modulus MPa	76923
	Yield Strength MPa	430
	Tangent Modulus MPa	1450
	Environment	22, °C
	Temperature C	

При приложении нагрузки свыше 200 кНм начала наблюдаться потеря устойчивости стенки колонны в сжатой зоне, а также значительные деформации в растянутой зоне в месте расположения болтов. На завершающем этапе нагружения конструкции наблюдались значительные деформации фланцевой пластины по сложной пространственной форме в растянутой зоне. Максимальные деформации растянутой зоны фланцевого соединения составили 20,947 мм. В процессе нагружения максимальные внутренние усилия были достигнуты в болтовых соединениях и составили 862,84 МПа. Относительная упругая деформация фланцевого соединения составила 0,0043, относительная пластическая деформация составила 0,296.

По результатам численного моделирования с применением МКЭ в расчетном комплексе Ansys Workbench фланцевого соединения узла S20_0_0_V была построена диаграмма «момент – угол поворота M-θ» (Рис. 13).

Заключение

Возможность прогнозирования жесткости для узловых элементов должна быть реализована благодаря более подробному описанию механизма работы соединения. В рамках экспериментальных исследований проведено сравнение разработанной аналитической модели изгибаемых элементов фланцевого соединения с результатами расчета, выполненного МКЭ. Проведен анализ полученных результатов, который показал сходимость для основных параметров напряженно-деформированного состояния с результатами численного эксперимента и результатами испытаний. В соответствии с выполненными исследованиями, можно говорить о том, что предложенная модель позволяет прогнозировать основные параметры работы фланцевых соединений стальных строительных конструкций на предварительной стадии расчета.

Предложенная аналитическая модель с применением метода переменных параметров упругости отражает все основные этапы изменения напряженно-деформированного состояния работающих на изгиб элементов фланцевого соединения двутавровой балки с колонной. Уточненная компонентная модель может быть применена на предварительной стадии расчета в дополнение к существующей методике Еврокод 3. Данный подход позволяет моделировать соединения в зависимости от предъявляемых требований. Предложенная аналитическая модель достаточно проста в реализации, вместе с тем, она отражает все этапы работы соединения вплоть до наступления предельного состояния. В то же время, применимость данного метода требует экспериментальной проверки и подтверждения. Для решения этой задачи необходимо проводить дальнейшие исследования в данной области.

Литература

1. Павлов А.Б. Основы проектирования стальных строительных конструкций каркасов зданий с учетом реальной изгибной жесткости и прочности узлов соединения элементов: автореф. дис. доктор техн. наук. Москва, 1996. 46 с.
 2. Da Silva .L.S., Santiago A.,Real P.V. Post-limit stiffness and ductility of end-plate beam-to-column steel joints // Computers and Structures 80. 2002. pp. 515–531.
 3. Da Silva .L.S.,Coelho A.G.,Neto E. L. Equivalent post-buckling models for the flexural behaviour of steel connections // Computers and Structures 77. 2000. pp. 615 - 624.
 4. Hicks S., Lawson R., Rackham J., Fordham P. Steel Buildings in Europe. Multi-Storey Steel Buildings. Part 2: Concept Design. Second edition. Berks, UK: The Steel Construction Institute (SCI), 2004. 75 p.
 5. Kulak G. L.,Fisher J. W.,Struik J. H. A. Guide to design criteria for bolted and riveted Joints. Second edition. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2001. 334 p.
 6. Sana N. El Kalash, Elie G. Journal of Constructional Steel Research 145 . 2018. pp. 518– 528.
 7. João Nuno Bregieiro Ribeiro. Assessment of the behaviour of T-stub joint under impact loading: Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Steel and Composite Construction. Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering .Coimbra, 2014. 89 p.
 8. Elie G. Hantouche , Nabil H. Abboud. Journal of Constructional Steel Research 95. 2014. pp. 279–289.
 9. Swanson J. A, Leon R.T. Journal of Structural Engineering 127(5). 2001. May. pp. 498-505.
-

10. Da Silva L.S., Coelho A. G. Journal of Constructional Steel Research 57 . 2001. pp. 45–70.
11. Girão Coelho A.M., Bijlaarda F.S.K. Heron, 55 (1). 2010. pp. 1-32.
12. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. Учебное пособие.. М.: Наука, 1986. 560 с.
13. SAP 2000 v. 14.0 "Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures". Berkley, California, USA: Computers and Structures, Inc., 2009. 47 p.
14. Стружанов В. В., Бурмашева Н. В. Теория упругости. Основные положения. Учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. 204 с.
15. Zhu C. Full-range Moment-Rotation Behaviour of Bolted Moment End-Plate Joints: Ph.D. thesis. Faculty of Engineering and IT School of Civil Engineering. The University of Sydney, 2016. 261 p.

References

1. Pavlov A.B. Osnovy` proektirovaniya stal`ny`x stroitel`ny`x konstrukcij karkasov zdaniy s uchetom real`noj izgibnoj zhestkosti i prochnosti uzlov soedineniya e`lementov [Fundamentals of designing steel building structures of building frames, taking into account the real bending stiffness and strength of the joints of the elements]: avtoref. dis. doktor tehn. nauk. Moskva, 1996. 46 p.
 2. Da Silva .L.S., Santiago A.,Real P.V. Computers and Structures 80. 2002. pp. 515–531.
 3. Da Silva .L.S.,Coelho A.G.,Neto E. L. Computers and Structures 77. 2000. pp. 615 - 624.
 4. Hicks S., Lawson R., Rackham J., Fordham P. Steel Buildings in Europe. Multi-Storey Steel Buildings. Part 2: Concept Design. Second edition. Berks, UK: The Steel Construction Institute (SCI), 2004. 75 p.
-

5. Kulak G. L., Fisher J. W., Struik J. H. A. Guide to design criteria for bolted and riveted Joints. Second edition. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2001. 334 p.
 6. Sana N. El Kalash, Elie G. Hantouche. Journal of Constructional Steel Research 145 (2018) 518– 528. doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.03.012.
 7. João Nuno Bregieiro Ribeiro. Assessment of the behaviour of T-stub joint under impact loading: Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Steel and Composite Construction. Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering. Coimbra, 2014. 89 p.
 8. Elie G. Hantouche , Nabil H. Journal of Constructional Steel Research 95. 2014. pp. 279–289.
 9. Swanson J. A, Leon R.T. Journal of Structural Engineering 127(5). 2001. May. pp. 498-505.
 10. Da Silva L.S., Coelho A. G. Journal of Constructional Steel Research 57 . 2001. pp. 45–70.
 11. Girão Coelho A.M., Bijlaarda F.S.K. Heron, 55 (1). 2010. pp. 1-32.
 12. Birger I.A., Mavlyutov R.R. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. Uchebnoe posobie.. M.: Nauka, 1986. 560 p.
 13. SAP 2000 v. 14.0 “Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures”. Berkley, California, USA: Computers and Structures, Inc., 2009. 47 p.
 14. Struzhanov V.V., Burmasheva N. V. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity. Main provisions. Studies manual]. Osnovny`e polozheniya. Uchebnoe posobie. Ekaterinburg: Izdatel`stvo Ural`skogo universiteta, 2019. 204 p.
 15. Zhu C. Full-range Moment-Rotation Behaviour of Bolted Moment End-Plate Joints: Ph.D. thesis. Faculty of Engineering and IT School of Civil Engineering. The University of Sydney, 2016. 261 p.
-



Дата поступления: 19.12.2023

Дата публикации: 23.01.2024