

УДК 624.014 (688.775.3)

Аналіз розрахунку болтів фланцевого з'єднання в умовах складного напружено-деформованого стану

Білик С.І., д.т.н., Бут М.О., Шпинда В.З.

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

Анотація. Розглянуто особливості розрахунку фланцевих з'єднань згідно з положеннями будівельних норм, машинобудівельної методики Біргера та математичного моделювання в розрахункових комплексах будівельного та мультифізичного напрямків. Зроблено порівняння методик та проведено верифікаційний тест роботи фланцевого з'єднання.

Аннотация. Рассмотрены особенности расчета фланцевых соединений в соответствии с положениями строительных норм, машиностроительной методики Биргера и математического моделирования в расчетных комплексах строительного и мультифизического направлений. Выполнено сравнение методик и проведен верификационный тест работы фланцевого соединения.

Abstract. Calculation features of flange connections in accordance with the provisions of building codes, Birger engineering methods and mathematical modeling in computational complexes of constructional and multi-physician directions. Comparison of methods and verification test concerning work of flanged connections are conducted.

Ключові слова: фланець, розрахунок, ПК Ліра, верифікаційний тест.

Постановка проблеми. Фланцеві з'єднання мають широке застосування в різних галузях промисловості. Незважаючи на стандартизацію фланців, вирішальний вибір виду, розмірів і складових даного виду з'єднань залишається за конструктором. В особливих випадках виникає необхідність конструювання фланців не передбачених вітчизняними нормами та стандартами. Дана робота присвячується аналізу розрахунку болтів фланцевих з'єднань при складному напружено – деформованому стані який виникає в болтах контактного фланцевого з'єднання (з'єднання без прокладок, які застосовуються в конструкціях що не потребують повної герметизації стиків) в нашому випадку – з'єднання направляючої і валу колеса огляду.

Аналіз останніх досліджень. Оскільки порядок проектування такого з'єднання поверхнево описаний у державних будівельних нормах, і є частково експериментальним, дана робота дає цінний досвід який знадобиться для аналізу та оптимізації методики розрахунку фланцевих з'єднань в цілому.

Метою роботи є аналіз розрахунку болтів фланцевого з'єднання напрямної та валу колеса огляду за чинними нормативними документами: СНиП II-23-81 [2], ДБН В.2.6-163 [1], Єврокод 3 [4], за методикою, описа-

ною в книгах Біргера І. А., Іосилевича Г. Б. [5], Волошина А. А. [6], а також із застосуванням програмних комплексів ПК «Ліра-Сапр 2012» і «Autodesk Simulation Mechanical» (ASM) для створення просторової моделі і проведення нелінійного розрахунку та порівняння даних, отриманих в результаті аналітичного розрахунку і застосування програмних комплексів.

Основними цілями є:

- провести аналітичний розрахунок згідно з чинними нормативними документами;
- задати в програмному комплексі ПК «Ліра-Сапр 2012» просторову модель фланцевого з'єднання, змодельовавши контактну роботу пластин фланцю;
- порівняти отримані зусилля в болтах із результатами аналітичних розрахунків;
- продемонструвати переваги і недоліки програмного комплексу «Ліра – Сапр 2012» у моделюванні та розрахунку вузлів сталевих конструкцій об'ємними елементами на прикладі фланцевого з'єднання;
- для порівняння результатів, отриманих в «Ліра-Сапр», з іншими програмними комплексами, провести розрахунок даного з'єднання в «Autodesk Simulation Mechanical».

Викладення основного матеріалу. Об'єктом дослідження є фланцеве з'єднання напрямної і валу колеса огляду що знаходиться на відмітці 102.5 м в будівлі «Батумського технологічного університету» [8, 9], проект якого був розроблений силами кафедри металевих та дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва та архітектури.

Для моделювання з'єднання прийняті наступні конструктивні рішення:

1. В роботі розглянутий варіант розрахунку фланцевого з'єднання зі сторони примикання напрямної і пластини фланцю, оскільки варіант з'єднання лафети і пластини фланцю з протилежної сторони не розглядається в у нормативних документах і є експериментальним, відповідно, приймаємо до порівняння фланцеві з'єднання, запроєктовані за вимогами: СНиП II-23-81; ДБН В.2.6-163; Єврокод 3; методикою галузевих розрахунків для машинобудівного призначення, описаних у [5].
2. Діаметр труби напрямної становить: $d = 720$ мм.
3. З'єднання двох пластин фланців на болтах (16 шт.) діаметром 48 мм, класу точності А, класу міцності 10.9, прийнятих за ГОСТ 7805-70.
4. Фланець і труби виготовлені зі сталі 09Г2С, що відповідає сталі класу С345.

5. Фрагмент з'єднання взятий до точки примикання опор до лафети для передачі зусилля з урахуванням перерозподілу навантаження на опори колеса огляду.

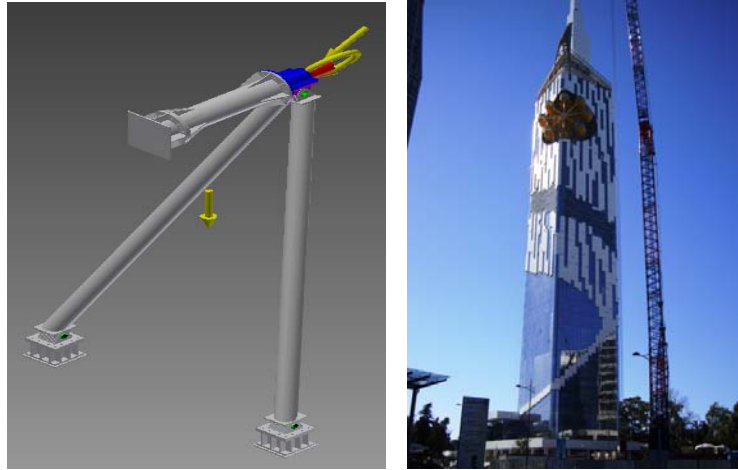


Рис. 1. Колесо огляду, розташоване у будівлі в м. Батумі, Грузія

Розрахунок виконується за комбінацією зусиль, що викликає найбільші зусилля розтягу в болтах. Збір навантажень на колесо огляду виконаний згідно зі СНиП 2.01.07-85 [3], що діє на території Грузії, де і знаходиться об'єкт. Зусилля, які виникають в елементах з'єднання, отримані з розрахунку, проведеного в ПК Ліра 9.6.

Розглянемо складний напружено-деформований стан з'єднання.

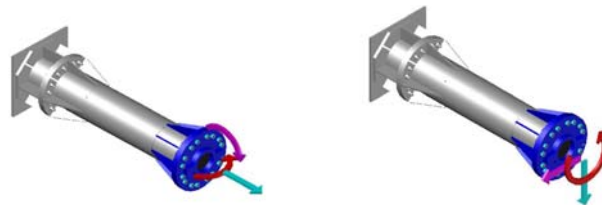


Рис. 2. Напружено-деформований стан болтів у з'єднанні

При одночасній дії моментів у двох площинах відбувається нерівномірний розподіл навантажень, відповідно, необхідний переріз болтів приймається за більш напруженими, що знаходяться у виділеній частині з'єднання.

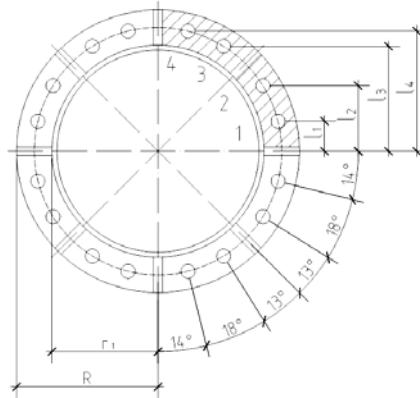


Рис. 3. Розподіл зусиль між болтами з'єднання

При цьому розподіл поздовжньої розтягуючої сили відбувається лінійно між усіма болтами:

$$N = \frac{N_x}{n}, \quad (1)$$

а дію моментів зводимо до зосереджених сил залежністю з урахуванням полярного моменту інерції:

$$P_k = \frac{l_k \times M_y (M_z) / 2}{\sum_{i=1}^4 l_i^2}; \quad (2)$$

Тоді повне зусилля розтягу в болті становить:

$$N_t = N + P_{z1} + P_{z2} + F_0 \quad (3)$$

Безпосередньо розглянемо методики розрахунку за нормативними документами:

При розрахунку болтового з'єднання за методикою ДБН [1] передбачається визначення несучої здатності болтів при роботі на:

— зріз:

$$N_{bs} = R_{bs} \times A_b \times n_s \times \gamma_b \times \gamma_c; \quad (4)$$

— розтяг:

$$N_{bt} = R_{bt} \times A_{bn} \times \gamma_c; \quad (5)$$

— зминання металу з'єднувальних елементів:

$$N_{bp} = R_{bp} \times d_b \times \sum t_{\min} \times \gamma_b \times \gamma_c. \quad (6)$$

Методика СНиП [2] побудована аналогічним чином, але з дещо іншими значеннями нормативних опорів та вимог щодо розміщення болтів.

Особливістю розрахунку за Єврокодом 3 [4] є надання вищих нормативних опорів сталі для болтових з'єднань, порівняно зі СНиП та ДБН, але разом з тим проводиться більш детальний розрахунок з'єднання з урахуванням таких додаткових факторів, як робота на продавлювання:

$$N_{p,Rd} = \frac{0,6 \times \pi \times d_m \times t_p \times f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7)$$

При розрахунку за методикою Біргера [5] приймаємо стрижень в якості моделі фланцю і припустимо, що контактні напруження постійні по ширині його перерізу і характеризуються розподіленими навантаженнями q .

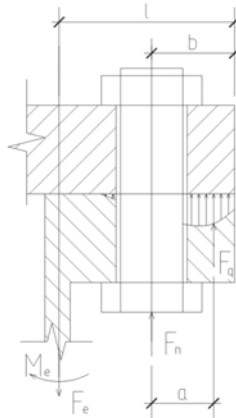


Рис. 4. Контактна робота пластин фланцевого з'єднання

Припустимо, що кінематичні переміщення фланців (зближення локальних осей координат) відбувається в результаті їх стиснення в зоні контакту, а це рівнозначно введенню в стик фланців умовного контактного шару, піддатливість якого дорівнює піддатливості фланців (λ_1 ; λ_2) при стисненні.

$$\lambda_o = \frac{2}{E_o \times \pi \times d_o \times tg\alpha} \ln \frac{(a + d_o) \times (a + l \times tg\alpha - d_o)}{(a - d_o) \times (a + l \times tg\alpha + d_o)} \quad (8)$$

Такий метод розрахунку описує більш правильно роботу з'єднання з фізичної точки зору, оскільки враховує такі фактори, як піддатливість елементів з'єднання, через постановку контактної плоскої задачі.

$$F_q = \frac{F_e \cdot \left(\frac{F_0}{F_e} - \frac{\lambda_0}{\lambda_\Sigma} \right)}{1 - \frac{\beta \cdot a^3}{6 \cdot \lambda_\Sigma}}; \quad (9)$$

Саме методика Біргера навела на думку про моделювання фланцевого з'єднання в середовищі МСЕ. Даний метод вказує на необхідність врахування контактної задачі при розрахунку фланцевих з'єднань, тому було прийнято рішення про проведення верифікаційного тесту з використанням сучасних МСЕ комплексів, а саме: ПК «Ліра-Сапр 2012».

Геометрія з'єднання була виконана згідно з вимогами СНиП, оскільки самі ці норми є чинними на території Грузії, і керуючись саме цими нормами, був виконаний розрахунок даного об'єкта.

Побудова моделі була виконана за допомогою програми AutoCAD. Таке рішення було прийняте як найбільш практичне серед відомих методів моделювання об'ємних тіл за рахунок побудови скінченно-елементної сітки, методом Кунса, що дозволило провести рівномірний поділ на СЕ з розмірами сторін не більше 20 мм. Після імпорту виконано видавлювання в об'ємні елементи та формування остаточної геометрії моделі.

Далі було задано граничні умови і жорсткісні характеристики задачі, після чого змодельовано контакти між пластинами фланців через 262 СЕ, що включаються в роботу лише при стисканні, що дає змогу правильно зобразити контактну роботу пластин фланців.

До схеми послідовно прикладене навантаження, а саме:

- власна вага;
- зовнішнє навантаження, задане за допомогою інструменту «Об'єднання переміщень».

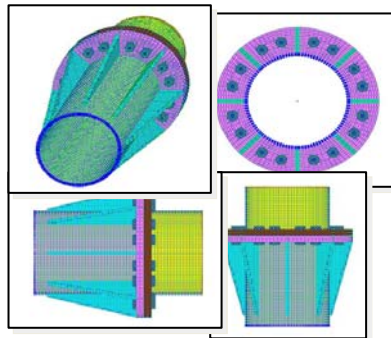


Рис. 5. Просторова комп'ютерна модель фланцевого з'єднання в програмі «Ліра-Сапр 2012».

Зусилля попереднього натягу болтів змодельовано у вигляді рівномірного нагріву елементів, що утворюють болти. Значення різниці температур ΔT знаходимо аналітично із закону Гука та закону лінійного розширення сталі від дії температури. В результаті зусилля попереднього натягу, що становить 162 кН, перетворено на температурний розігрів розміром $3,615^\circ$.

$$\Delta T = \frac{F}{E \cdot A \cdot \alpha} = \frac{162 \cdot 10^3}{2,06 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 0,024^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-4}} = 3,6215^\circ, \quad (10)$$

де $\alpha_L = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T}$ – коефіцієнт температурного розширення сталі.

За рахунок нелінійності було змодельовано реальну послідовність прикладання навантажень на конструкцію. Для отримання зусилля розтягу в болті розподіляємо напруження по площі його перерізу. Для порівняння результатів, отриманих в ПК «Ліра-Сапр 2012» з іншими програмними комплексами, розглянемо розрахунок виконаний в ASM.

Для створення моделі було використано інструмент твердого моделювання AI 2013, в якому враховані всі технологічні рішення щодо з'єднань вузла, а саме: зварні з'єднання, умови закріплення, прикладання навантажень, а також заданий односторонній контакт пластин фланцю.

Особливістю моделювання в ASM порівняно з ПК «Ліра-Сапр 2012» є простіший процес завдання болтових з'єднань. За рахунок роботи з твердим елементом для моделювання достатньо вказати тип болтового з'єднання, перерізуючи площини, площини закріплення та геометрію болтів. Але разом з тим процес завдання навантажень на з'єднання є більш трудомістким порівняно з Лірою.

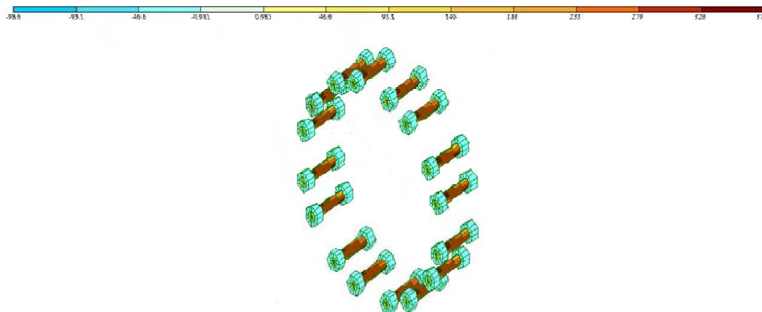


Рис. 6. Ізополя напружень, які виникають в болтах по локальній осі Z

Обговорення результатів. Нижче наведена гістограма порівняння зусиль за представленими методиками в чотирьох болтах, які будуть сприймати основні зусилля розтягу. У зображених результатах спостерігається деяка

розбіжність значень між різними методиками розрахунку, а саме 14,4 % між максимальними зусиллями розтягу, які виникають в болті № 3. Це пояснюється різницею геометричних розмірів пластин фланців, яка залежить від вимог відповідних норм щодо розташування болтів у багатоболтовому з'єднанні. Безпосередньо різниця між розрахунком, виконаним із використанням ПК Ліра, і аналітичним розрахунком за СНиП обумовлена постановкою задачі у вигляді просторової моделі, поступовістю прикладання навантаження, а також врахуванням контактної роботи пластин з'єднання у ПК «Ліра-Сапр 2012», чого не передбачається вимогами СНиП II-23-81.

Отримані результати розрахунку в ASM є близькими до результатів «Ліри-Сапр», а розбіжність результатів, що складає 4,2 % у найбільш напруженому болті, пояснюється різницею у моделюванні з'єднань труби і пластин фланцю в цих програмних комплексах.

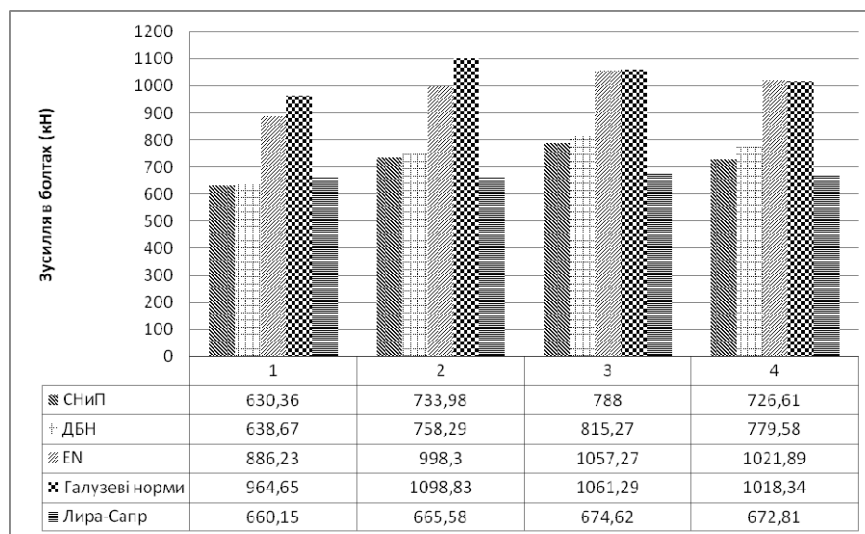


Рис. 7. Гістограма порівняння зусиль, які виникають в болтах при роботі з'єднання на розтяг

Висновки

Як показує досвід проектування, сучасні програмні комплекси дозволяють точніше розглянути роботу з'єднання за рахунок можливості створення просторової твердотілої моделі, поетапного прикладання нелінійних навантажень і відтворення фізичних процесів (таких як контактна робота пластин фланців), що дозволяє зменшити зусилля, які виникають в болтах, у порівнянні зі спрощеними аналітичними методиками, представленими у нормативних документах, що упускають дані аспекти.

Саме тому для підвищення надійності фланцевих з'єднань необхідно застосовувати сучасні методи проектування, засновані на широкому використанні програмних комплексів, які дозволяють провести точний аналіз роботи з'єднання, врахувати розподіл зусиль, визначити запаси міцності і в результаті – запроектувати надійну конструкцію.

Література

- [1] Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу : ДБН В.2.6-163:2010. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с. – (Конструкції будівель і споруд. Державні будівельні норми України).
- [2] Стальные конструкции : СНиП II-23-81*. – Офиц. изд. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
- [3] Нагрузки и воздействия : СНиП 2.01.07-85. – Офиц. изд. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 35 с.
- [4] Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-5. Пластинчасті конструктивні елементи (EN 1993-1-5:2006, IDT) : ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012 : проект [Електронний ресурс] / ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського», ТК 301 «Металобудівництво». – Електронні дані. – К. : «НОРМАТИВ™ PRO». – (Нормативно-правове забезпечення діяльності проектних і будівельних організацій України).
- [5] Биргер И. А. Резьбовые и фланцевые соединения / И. А. Биргер, Г. Б. Иосилевич. – Москва : Машиностроение, 1990. – 367с.
- [6] Волошин А. А. Расчет и конструирование фланцевых соединений / А. А. Волошин – Ленинград : Машиностроение, 1979. – 126 с.
- [7] Болты с шестигранной головкой класса точности А. Конструкция и размеры [Електронний ресурс] : ГОСТ 7805-70 – Електронні дані. – К. : ТОВ «Інформаційно-маркетинговий центр», 2010. – Інформаційно-довідкова система «Зодчий», версія 9.07. – (Нормативно-правове забезпечення діяльності проектних і будівельних організацій України).
- [8] Білик А. С. Атракціон у висотній будівлі технологічного університету м. Батумі / А. С. Білик, М.О. Бут // Промислове та цивільне будівництво : науково-виробничий журнал. – 2013. – № 1. – С. 37–42.
- [9] Расчёт колеса обозрения, закреплённого в высотном здании : отчет о НИР / рук. А. С. Билык, М. А. Бут. – К. : 2012. – 78 с. – Библиогр.: с 77-78. — Деп. в НИЧП «Вартість», № 75.

Надійшла до редколегії 20.08.2014 р.