

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ НА РОЗПОДІЛ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ ВИТКАМИ КОНІЧНОГО З'ЄДНАННЯ

Т. О. Пригоровська, А. С. Величкович, Л. Я. Роп'як

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна. E-mail: pryhorovska@gmail.com

Досліджено вплив похибок виготовлення деталей конічного різьбового з'єднання на розподіл навантаження між витками елементів різьбового з'єднання. Розглянуто конічне різьбове з'єднання як багато разів невизначена система. Отримано аналітичні зусилля в витках конічного різьбового з'єднання. Дослідження проводили на основі одновимірних моделей. Розглянуто кілька комбінацій матеріалів ніпеля та муфти: ніпель (долото) – сталь/твердий сплав, муфта (буровий замок) – сталь; ніпель (долото) – сталь/твердий сплав, муфта (буровий замок) – алюміній; ніпель (долото) – сталь/твердий сплав, муфта (буровий замок) – титан. Встановлено, що максимальне навантаження припадає на перші та останні витки. Встановлено, що сумісна дія похибок (за кроком та за кутом конічної різьби) викликає збільшення неоднорідності розподілу навантаження: зростає навантаження на перший та останній виток, не суттєво знижуючись для всіх решти витків. Вперше здійснено дослідження розподілу напружень у реальних витках деталей з'єднання, які виготовлені із похибками кроку та кута різьби; встановлено вплив похибок виготовлення деталей з'єднання на міцність різьбового з'єднання. Розроблена методика дозволяє проводити аналіз роботи в системі конічного різьбового з'єднання з урахуванням дискретності геометричних параметрів різьби та механічних властивостей деталей з'єднання.

Ключові слова: різьба, похибки, матеріали, долото, замок.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ВИТКАМИ КОНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ

Т. А. Пригоровская, А. С. Величкович, Л. Я. Ропьяк

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа
ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, 76000, Украина. E-mail: pryhorovska@gmail.com

Исследовано влияние погрешностей изготовления деталей конического резьбового соединения на распределение нагрузки между витками элементов резьбового соединения. Рассмотрено коническое резьбовое соединение как несколько раз неопределенная система. Получены аналитические усилия в витках конического резьбового соединения. Исследование проводили на основе одномерных моделей. Рассмотрено несколько комбинаций материалов нипеля и муфты: нипель (долото) – сталь / твердый сплав, муфта (буровой замок) – сталь; нипель (долото) – сталь / твердый сплав, муфта (буровой замок) – алюминий; нипель (долото) – сталь / твердый сплав, муфта (буровой замок) – титан. Установлено, что максимальная нагрузка приходится на первые и последние витки. Установлено, что совместное действие погрешностей (по шагу и по углу конической резьбы) вызывает увеличение неоднородности распределения нагрузки: возрастает нагрузка на первый и последний виток, не существенно снижается для всех остальных витков. Впервые проведено исследование распределения напряжений в реальных витках деталей соединения, изготовленные из погрешностями шага и угла резьбы; установлено влияние погрешностей изготовления деталей соединения на прочность резьбового соединения. Разработанная методика позволяет проводить анализ работы в системе конического резьбового соединения с учетом дискретности геометрических параметров резьбы и механических свойств деталей соединения.

Ключевые слова: резьба, погрешности, материалы, долото, замок.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Протягом останніх десятиліть за кордоном і у нас в країні безперервно проводилася складна і трудомістка робота з поліпшення конструкцій нафто- і газопромислового обладнання, їх окремих вузлів, технологій виробництва, вдосконалення матеріалів, хіміко-термічної обробки, армування та ін. Це пояснюється тим, що це обладнання працює за умов навантажень у десятки тон, при тиску до 200 атмосфер, у високоабразивному корозійному середовищі. Актуальність теми дослідження пояснюється тим, що похибки виготовлення деталей можуть бути причиною відмови різьбових з'єднань, що спричиняє виникнення аварій; тоді як вартість заміни такого обладнання, проведення спуско-піднімальних операцій, ліквідації аварій є надзвичайно високою.

Основним видом з'єднання нафтогазпромислового обладнання є різьбове трубне або замкове конічне з'єднання за ГОСТ 28487–90 та ГОСТ 6211-81

відповідно. Такі з'єднання забезпечують герметичність, швидке згвинчування, а також здатність передавати великі крутні моменти та осьові навантаження, що є особливо актуальним як для буріння, так і для нафтогазовидобутку. Бурові долота в процесі експлуатації піддаються різного роду навантаженням, в тому числі змінного і ударного характеру [1]. Змінні та ударні навантаження викликають послаблення різьбового з'єднання, зниження коефіцієнта тертя між витками, що може призвести до змінання різьби та руйнування елементів з'єднання, а також і саморозгвинчування різьбових з'єднань [2].

Висока концентрація напружень у крайніх витках різьбового з'єднання, циклічна пружна чи пластична деформація та утворення тріщин у зонах концентрації напружень ставить високі вимоги до технології виготовлення різьби [3]. Конструкція деталей різьбового з'єднання передбачає певні допуски на конструктивні елементи різьби. Так, точність

виготовлення деталей визначається точністю за кроком, точністю кута нахилу бічної сторони профіля, кута конуса та точністю діаметрів западин і вершин різьби. При цьому, дослідниками, переважно, визначається характер розподілу навантажень між витками різьби, яка має ідеальний профіль, тобто питання впливу точності виготовлення деталей на характер розподілу навантаження між витками конічної різьби, у з'єднанні практично, не розглядалося. В зв'язку із цим постає проблема визначення впливу точності виготовлення деталей на характер розподілу навантаження між витками різьби.

Вперше задача про характер розподілу навантажень між витками різьби була розв'язана М.С. Жуковським, котрий замінив гвинтоподібну циліндричну різьбу кільцеподібними виступами, які отримують деформацію зсуву під дією прикладеного навантаження. Навантаження на кожен виток визначалося із системи рівнянь, число яких рівне числу витків різьби. На основі досліджень М.С. Жуковського було зроблено висновок, що кожний наступний виток різьби сприймає меншу частину навантаження, шостий виток різьби сприймає лише 1% навантаження, тоді як перший – близько 33%. Причиною нерівномірного розподілу навантаження є пружні деформації різних знаків гвинта та гайки: гвинт розтягується, а гайка стискається. Цей різниця в характері деформацій особливо велика в області першого витка різьби, що вважається опорною поверхнею шурупів, де шнек і шків навантажені повною осевою силою. В області верхніх витків витяг розтягується меншою силою, так як частина осевого навантаження передана нижче розташованим витками різьби на гайку.

І.А. Біргер запропонував інакший метод, який враховував кінцеве число неперервних витків циліндричної різьби, із врахуванням деформацій зсуву і згину. Основна його відмінність полягає в тому, що різьбове з'єднання розглядається не як сукупність кільцевих виступів, а як з'єднання з безперервними витками. Був отриманий такий розподіл навантаження між десятьма витками: 34%: 22,7%: 15,1%: 11%: 6,8%: 4,5%: 3%: 2%: 1,3%: 0,9%. Цей розподіл підтвердив розподіл, визначений М.С. Жуковським, проте його перевагою є те, що запропонований підхід дозволив відмовитися від використання рівнянь у кінцевих різницях і застосовувати диференціальні рівняння, рішення яких можна легко отримати в замкнутій формі.

Щодо конічної різьби, то вперше дослідження розподілу навантаження за витками конічної різьби було проведено А.Е. Сарояном. В пізніших дослідженнях С.А. Бабаян розглянув розподіл навантаження по безперервним виткам конічних різьбових з'єднань типу «болт-гайка», для яких на основі умови спільності деформації тіла та витків болта і гайки отримані диференціальні рівняння, що розв'язуються чисельними методами. Він побудував теоретичні залежності розподілу навантаження таких параметрів різьби, як відхилення конусності та кроку. Проте, ці залежності отримані у виді диференціальних рівнянь, розв'язок яких є неперервною функцією, тоді як реальний розподіл навантаження є набором

дискретних значень, а також не представлено розв'язку рівнянь розподілу навантажень та практичних результатів.

Експериментальне підтвердження розподілу навантаження в витках різьбового з'єднання було виконано Paland E.G., який визначав навантаження на витки, наклеюючи тензорезистори на бічні грані гайки.

Сучасним інструментом дослідження розподілу навантаження на витки різьби є метод скінчених елементів. В роботах [2–5], на відміну від методу визначення розподілу напружень за витками різьби запропонованого І.А. Біргером, приводиться метод розрахунку, що враховує сили тертя в елементах різьбового з'єднання і точність її виготовлення, зміщення витка від вигину, зрізу та радіальні деформації від сил на торцях витка і від сил осевого стиснення або розтягування різьби. Перевірка здійснюється методом скінчених елементів. Встановлено, що максимальні напруження виникають в першій западині ніпеля, при чому основними напруженнями, що призводять до руйнування різьбових з'єднань, є осеві, оскільки різьбове з'єднання навантажується осевою силою та крутним моментом, який також спричиняє розтяг вздовж осі. Для зменшення концентрації напружень в западині першого витка пропонується виготовляти різьбу із навантаженим першим витком.

Використання методу скінчених елементів для дослідження розподілу навантаження між витками різьби дозволило встановити, що розподіл навантажень між витками різьби залежить від матеріалів, з яких виготовлені елементи з'єднання (умовний болт і умовна гайка). Так, в роботі [6] розглянуто розподіл навантаження між витками імпланту, що має конічну різьбову поверхню, який вкручений в кісткову тканину. Встановлено, що основний вплив на характер розподілу навантаження між витками різьби чинить конфігурація опорної частини імпланту, більш інтенсивно навантаженими є витки, що контактують з компактною кісткою і перші, що контактують з губчастою тканиною. Тобто, встановлено, що найбільш інтенсивно навантаженими є ті витки одного і того ж імпланту, що першими контактують із різними матеріалами (спочатку із кісткою, а потім із губчастою тканиною).

Застосування методу скінчених елементів дало змогу дослідити вплив технологічних параметрів виготовлення деталей з'єднання на розподіл напружень між витками різьби. Так, в роботі [7] встановлено, що збільшення шорсткості викликає більш рівномірний розподіл осевого навантаження, проте зниження шорсткості поверхні профілю витків різьби сприяє зменшенню контактних деформацій, що призводить до збільшення нерівномірності навантаження за довжиною згвинчування.

В сучасних дослідженнях розподіл навантаження між витками різьби розглядається, найперше, з точки зору забезпечення міцності деталей з'єднання. Так, розподіл напружень з урахуванням концентратора напружень – западини різьби – розглядається в роботі Patterson E.A. Тут встановлено, що жодна із розглянутих аналітичних теорій розподілу напружень між витками різьби не враховує зміни геометрії коли западини

та вершини витка різьби, і, відповідно, межа втомного руйнування різьби за такими теоріями є значно вищою, ніж фактична, особливо для тих випадків, коли зміна параметрів геометрії різьби відрізняється від стандартної. В роботі [8] з використанням методу скінчених елементів досліджується зміна параметрів западини та вершини різьби, які б забезпечували зменшення напружень в цих місцях. Встановлено, що зменшення діаметру болта викликає зменшення напружень в западинах різьби.

Поряд із тим, в роботі [9] встановлено, що розподіл навантаження між витками різьби при статичному навантаженні є відмінним від розподілу навантаження між витками різьби при динамічному навантаженні. В випадку динамічного навантаження характер розподілу залишається таким самим, проте зростає навантаження на четвертий виток, зменшуючись для першого.

Пропонуються певні шляхи зменшення нерівномірності розподілу навантаження між витками різьби. В окремих патентах запропоновано спосіб вирівнювання навантаження, що полягає у виготовленні витків гайки із постійно зростаючим змінним кроком, а монтаж з'єднання досягається при послідовно зростаючій величині моменту згинчування. Наприклад, пропонується встановлювати між гайкою і болтом додаткову різьбову вставку, яка б давала змогу забезпечити ефект змінного кроку між гайкою та болтом [10, 11].

Таким чином, підсумовуючи наведене вище, можна сказати:

- розрахунки, проведені за методами І.Є. Жуковського та І.А. Біргера та послідовниками являють собою залежності отримані у виді диференціальних рівнянь, розв'язок яких є неперервною функцією, тоді як реальний розподіл навантаження є набором дискретних значень, тобто моделі різьби І.Є. Жуковського та І.А. Біргера не дозволяють врахувати дискретність як геометричних параметрів (для конічних різьб), так і механічних властивостей матеріалів болтів та гайок.

- деформації в різьбі, пов'язані з похибками виготовлення профілю, контактні деформації та місцеві пластичні деформації дещо знижують навантаження на перший виток різьби;

- на характер розподілу зусиль впливають такі конструктивні параметри з'єднання: висота контактуючої різьбової частини; товщина стінки муфти; крок різьби; профіль різьби; матеріал, з якого виготовлені ніпель та муфта.

Недослідженими залишаються такі питання:

- дослідження розподілу напружень у реальних витках деталей з'єднання, які виготовлені із похибками кроку та кута різьби;

- дослідження впливу похибок виготовлення деталей з'єднання на міцність різьбового з'єднання.

Завданнями дослідження є:

- побудова математичної моделі схеми нарізювального конічного з'єднання;

- дослідження впливу похибок на розподіл навантаження.

В зв'язку із зазначеним вище, метою дослідження є вивчення впливу похибок виготовлення деталей конічного різьбового з'єднання на розподіл наван-

таження між витками елементів різьбового з'єднання.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Схематичне зображення моделі для оцінки розподілу зусиль у витках конічного різьбового з'єднання подане на рис. 1.

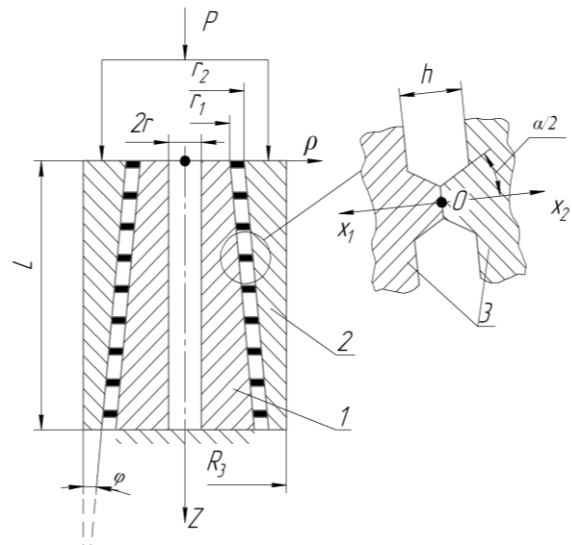


Рисунок 1 – Схема різьбового з'єднання: 1 – ніпель; 2 – муфта; 3 – модель з'єднувального елемента

Конічна втулка з осьовим циліндричним отвором (ніпель) 1 вперта в жорстку перепону. До неї коаксіально приєднана циліндрична втулка з осьовим конічним отвором (муфта) 2. На верхній торцеві втулки 2 діє вертикальне рівномірно розподілене навантаження P . Втулки 1 і 2 з'єднані між собою n з'єднувальними елементами 3, які схематизують N контактних пар витків різьби. Прагнучи аналітично оцінити і врахувати найбільш суттєві параметри сформульованої задачі і при цьому одержати просту і компакту методику отримання результату, дослідження проводитимемо на основі одновимірних моделей втулок та з'єднувальних елементів.

Модель з'єднувального елемента 3 базується на гіпотезі про те, що під дією зовнішнього навантаження витки різьби контактують в середніх точках витків (рис. 2).

Таким чином, за однакового зовнішнього навантаження величини абсолютного зсуву Δ контактної пари «виток різьби ніпеля – виток різьби муфти» (рис. 2, а) і модельного з'єднувального елемента (рис. 2, б) будуть однаковими. Механічні властивості втулок 1 та 2 повністю характеризуються їх модулями Юнга E_1 та E_2 , а механічні властивості з'єднувальних елементів – модулями зсуву G_1 і G_2 . Необхідно визначити, як розподілиться зусилля P між витками різьби. Дослідження проводимо в геометрично та фізично лінійній постановці.

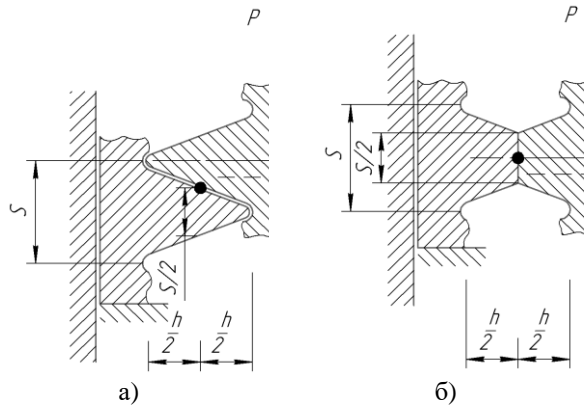


Рисунок 2 – Схематизація контактної взаємодії двох витків різьби: а–контактна пара «виток різьби ніпеля - виток різьби муфти»; б – модель з’єднувального елемента

Площі поперечного перерізу втулок 1, 2 (ніпеля та муфти):

$$F_1(z) = \frac{\pi}{4} [(r_1 + ztg\varphi)^2 - r^2];$$

$$F_2(z) = \frac{\pi}{4} [R_3^2 - (r_2 + ztg\varphi)^2]. \quad (1)$$

Площі зсуву n -го з’єднувального елемента:

$$A_{1n}(x_1) = 2\pi \left(\rho(\zeta n) + \frac{h}{2} - x_1 \right) \left(\frac{s}{2} + 2x_1tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right);$$

$$A_{2n}(x_2) = 2\pi \left(\rho(\zeta n) + \frac{h}{2} + x_2 \right) \left(\frac{s}{2} + 2x_2tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right), \quad (2)$$

де $\rho(z) = r_1 + ztg\varphi$, а $\rho(\zeta n) = r_1 + \zeta ntg\varphi$ – радіус ніпеля по впадинах різьби на рівні n -го витка, $\zeta = L/N$, N – кількість витків у з’єднанні.

Запишемо систему з $N - 1$ рівнянь сумісності деформацій при навантаженні розглянутої моделі (рис. 1)

$$B\bar{Q} + \bar{\Delta}_p = 0, \quad (3)$$

де
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1,N-1} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2,N-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{N-1,1} & \delta_{N-1,2} & \dots & \delta_{N-1,N-1} \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Delta}_p = \begin{bmatrix} \Delta_{1p} \\ \Delta_{2p} \\ \dots \\ \Delta_{N-1,p} \end{bmatrix}, \quad \bar{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_{N-1} \end{bmatrix}.$$

де B – матриця податливості, складена з коефіцієнтів δ_{ik} – переміщень i -го елемента від k -ої одиничної сили; $\bar{\Delta}_p$ – вектор вантажних переміщень; \bar{Q} – вектор шуканих зусиль у витках різьби.

Головні та побічні коефіцієнти системи (3) з урахуванням фізичних співвідношень такі:

$$\delta_{mm} = \int_{\zeta n}^{\zeta N} \left[\frac{1}{E_1 F_1(z)} + \frac{1}{E_2 F_2(z)} \right] dz + \frac{1}{G_1} \int_0^{h/2} \left[\frac{1}{A_{1n}(x_1)} + \frac{1}{A_{1N}(x_1)} \right] dx_1 + \frac{1}{G_2} \int_0^{h/2} \left[\frac{1}{A_{2n}(x_2)} + \frac{1}{A_{2N}(x_2)} \right] dx_2, \quad n \in [1, N-1]; \quad (4)$$

$$\delta_{mm} = \int_{\zeta n}^{\zeta N} \left[\frac{1}{E_1 F_1(z)} + \frac{1}{E_2 F_2(z)} \right] dz + \frac{1}{G_1} \int_0^{h/2} \frac{dx_1}{A_{1N}(x_1)} + \frac{1}{G_2} \int_0^{h/2} \frac{dx_2}{A_{2N}(x_2)},$$

$$m \in [1, N-1], \quad n > m. \quad (5)$$

Якщо у виразі (5) $m > n$, то у першому інтегралі слід замінити нижню межу інтегрування $\zeta \cdot n$ на $\zeta \cdot m$.

Вільні члени системи (3)

$$\Delta_{mp} = -P \left[\frac{1}{E_2} \int_{\zeta n}^{\zeta N} \frac{dz}{F_2(z)} + \frac{1}{G_1} \int_0^{h/2} \frac{dx_1}{A_{1N}(x_1)} + \frac{1}{G_2} \int_0^{h/2} \frac{dx_2}{A_{2N}(x_2)} \right],$$

$$n \in [1, N-1] \quad (6)$$

Крім того, слід додатково залучити дискретний аналог рівняння глобальної рівноваги конструкції

$$\sum_{i=1}^N Q_i - P = 0. \quad (7)$$

Розв’язуючи задачу (3), (7) знайдемо зусилля в усіх витках різьби

$$\bar{Q} = -B^{-1} \bar{\Delta}_p = 0, \quad Q_N = P - \sum_{i=1}^{N-1} Q_i. \quad (8)$$

Виконання розрахунків.

Різьбовим з’єднанням, що досліджується з’єднання елементів бурового обладнання, що з’єднуються за допомогою замкової різьби, а саме долота і бурового замка. Схема кінчної замкової різьби показана на рис. 3.

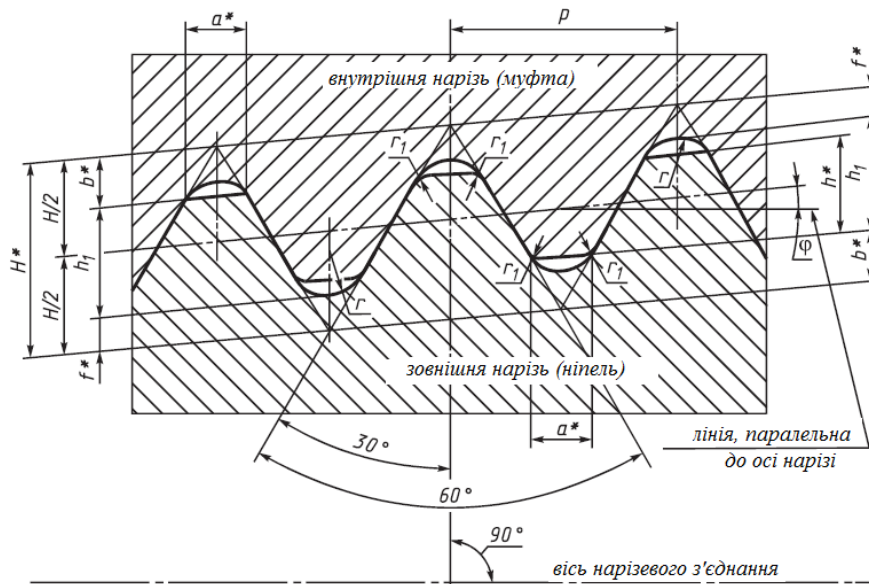


Рисунок 3 – Профіль і основні розміри конічної замкової різьби за ГОСТ 24787-90:
 P – крок різьби, K – конусність різьби, ϕ – кут нахилу різьби, H – висота вихідного трикутника різьби,
 h_1 – висота профілю різьби, h – робоча висота профілю різьби, b – зріз вершини різьби,
 f – зріз западини різьби, a – ширина площадки різьби, r – радіус заокруглення ширини різьби,
 r_1 – радіус заокруглення вершин профілю різьби

Досліджувалися з'єднання в виді ніпеля і муфти. Муфта була закріплена по торцевій та бічній поверхнях, до торця ніпеля було прикладене навантаження $M=100$ кНм. Такий вибір навантаження відповідає реальним умовам складання з'єднання, описаного в [12].

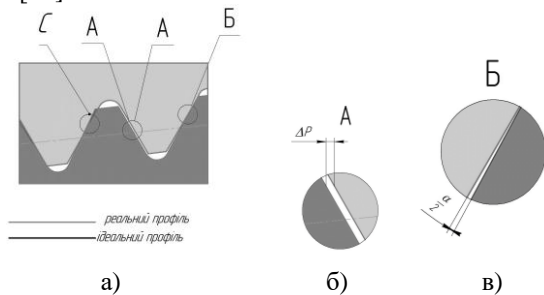


Рисунок 4 – Схема взаємодії бічних поверхонь елементів конічного різьбового з'єднання:
 а) – реальний та ідеальний профілі з'єднання,
 б) – відхилення по кроку різьби,
 в) – відхилення по профілю різьби

За приклад вибрали з'єднання 3-152, параметри якого представлено у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні параметри замкової різьби 3-152 за ГОСТ 28487-90, мм

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Форма профілю	Ш	d_{cp}	146,248
ϕ , град	$4^\circ 45' 48''$	H	5,487
P	6,35	K	1:6
h_1	3,755	h	3,293
b	1,097	f	0,635
a	1,270	r/r_1	0,635/0,38

Граничні відхилення параметрів замкової різьби, які моделюються, не повинні перевищувати за ГОСТ 28487-90:

- кроку на всій довжині різьби, мм $\pm 0,11$
- кута нахилу бічної сторони профілю $30^\circ \pm 30''$
- конусності на довжині конуса 100 мм $+0,25$
- відхилення висоти профілю різьби $0,18$ мм

Розглянули кілька комбінацій матеріалів ніпеля та муфти:

- Ніпель (долото) – сталь/твердий сплав, муфта (буровий замок) – сталь;
- Ніпель (долото) – сталь/твердий сплав, муфта (буровий замок) – алюміній;
- Ніпель (долото) – сталь/твердий сплав, муфта (буровий замок) – титан.

Ці комбінації матеріалів вибрані з метою повноти досліджень, певні комбінації матеріалів можуть не застосовуватися в бурінні, проте застосовуються в інших в інших галузях.

Параметри матеріалів (Модулі Юнга та модулі зсуву), які використовувалися в розрахунках, були такими: сталь $E_{CT}=200$ ГПа, $G_{CT}=80$ ГПа; твердий сплав $E_{HARD}=600$ ГПа, $G_{HARD}=220$ ГПа; алюміній $E_{AL}=70$ ГПа, $G_{AL}=25,5$ ГПа; титан $E_{Ti}=112$ ГПа, $G_{Ti}=41$ ГПа.

В табл. 2 представлено результати визначення розподілу зусиль у витках конічного різьбового з'єднання для всіх аналізованих комбінацій матеріалів, а також результати розрахунків впливу похибок виготовлення на розподіл навантаження між витками різьби. Результати розрахунків для випадків деталей з'єднання без похибок використали формули (1)-(6). Для виконання розрахунків було використано середовище MathCad, при чому в розрахунках величини відхилень задавалися за допомогою вбудованої функції генератора випадкових чисел, заданих за рівномірним розподілом у певних межах. За

допомогою вбудованої функції рівномірного розподілу визначали вплив похибок виготовлення деталей різьбового конічного з'єднання:

- визначали вплив похибок за кроком – задавали величину кроку із врахуванням допуску по кроку, який задавався за допомогою вбудованої функції випадкових чисел, заданих за рівномірним розподілом у межах допуску по кроку;

- визначали вплив похибок за кутом – задавали величину кута конуса із врахуванням допуску за кутом, який задавався за допомогою вбудованої функції випадкових чисел, заданих за рівномірним розподілом у межах допуску за кутом;

- визначали сумісний вплив обох видів похибок (за кроком і за кутом) – задавали величину кроку та кута конуса із врахуванням допуску за кроком та кутом відповідно, які задавалися за допомогою вбудованих функцій випадкових чисел, заданих за рівномірним розподілом у межах відповідних допусків.

Таблиця 2 – Результати розрахунків впливу похибок виготовлення на розподіл навантаження між витками конічної замкової різьби, %

№ витка	Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кроком	Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кутом різьби	Сумісна дія випадкових факторів (випадкового відхилення по кроку та за кутом різьби)	Навантаження на виток у випадку ідеального профілю
Ніпель (долото) – сталь, муфта (буровий замок) – сталь				
1	21,419	21,363	21,483	21,549
2	7,0078	7,0353	7,0675	7,035
3	3,4364	3,4546	3,4943	3,473
4	2,5918	2,601	2,6496	2,6391
5	2,5322	2,5404	2,5899	2,5805
6	3,032	3,0484	3,0856	3,0668
7	5,0479	5,0853	5,0808	5,0376
8	12,726	12,782	12,677	12,612
9	42,207	42,09	41,872	42,007
Ніпель (долото) – твердий сплав, муфта (буровий замок) – сталь				
1	38,696	38,553	38,774	38,803
2	13,186	13,244	13,251	13,239
3	5,6175	5,6647	5,6731	5,6635
4	3,3519	3,376	3,4012	3,3963
5	2,7091	2,7226	2,7522	2,7495
6	2,7467	2,761	2,7793	2,7764
7	3,7107	3,7359	3,7174	3,7124
8	7,6136	7,6476	7,5478	7,5409
9	22,368	22,294	22,104	22,119

Продовження табл. 2

№ витка	Навантаження на виток у випадку ідеального профілю	Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кроком	Навантаження на виток у випадку випадкового відхилення за кутом різьби	Сумісна дія випадкових факторів (випадкового відхилення за кроком та за кутом)
Ніпель (долото) – сталь, муфта (буровий замок) – алюміній				
1	20,946	20,955	20,997	21,006
2	14,517	14,519	14,568	14,57
3	10,532	10,531	10,577	10,576
4	8,189	8,1859	8,2239	8,2208
5	7,0383	7,0348	7,0587	7,0552
6	6,8885	6,8851	6,8889	6,8855
7	7,773	7,7704	7,7461	7,7435
8	9,9773	9,9767	9,9135	9,9129
9	14,138	14,142	14,027	14,031
Ніпель (долото) – сталь, муфта (буровий замок) – алюміній				
1	25,581	25,614	25,617	25,65
2	18,337	18,349	18,372	18,384
3	13,306	13,305	13,334	13,334
4	9,8708	9,8642	9,8898	9,8832
5	7,6184	7,6092	7,6257	7,6166
6	6,2894	6,2797	6,2833	6,2736
7	5,7554	5,7465	5,7338	5,7249
8	6,0164	6,0097	5,9769	5,9701
9	7,2255	7,223	7,1663	7,1637
Ніпель (долото) – сталь, муфта (буровий замок) – титан				
1	18,052	18,12	18,106	18,157
2	12,143	12,149	12,197	12,202
3	8,7815	8,7609	8,8321	8,8168
4	7,0584	7,0274	7,1006	7,0773
5	6,5267	6,4925	6,555	6,5294
6	7,0695	7,037	7,0766	7,0522
7	8,8714	8,8479	8,8463	8,8286
8	12,484	12,486	12,411	12,413
9	19,014	19,08	18,874	18,923
Ніпель (долото) – сталь, муфта (буровий замок) – титан				
1	24,017	24,003	24,06	24,142
2	17,027	17,023	17,069	17,093
3	12,35	12,351	12,385	12,379
4	9,2969	9,3003	9,3219	9,3021
5	7,4348	7,4393	7,4467	7,4214
6	6,5198	6,5243	6,5155	6,4898
7	6,4699	6,4737	6,4454	6,4234
8	7,3697	7,372	7,3204	7,3073
9	9,515	9,5141	9,4367	9,4419

На рис. 5 та рис. 6 подані результати визначення розподілу зусиль у витках конічного різьбового з'єднання для всіх зазначених вище комбінацій матеріалів.

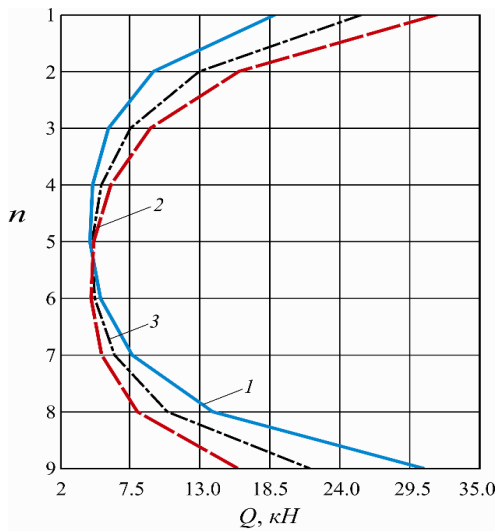


Рисунок 5 – Розподіл зусиль у витках конічного різьбового з'єднання (сталевий ніпель):

- 1 – сталевий ніпель та сталева муфта;
- 2 – сталевий ніпель та алюмінієва муфта;
- 3 – сталевий ніпель та титанова муфта

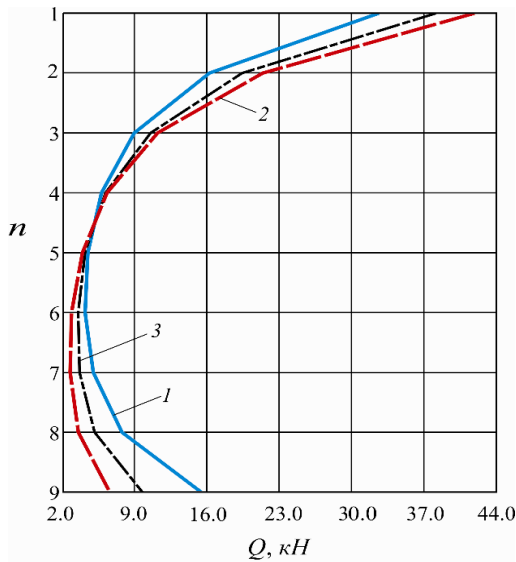


Рисунок 6 – Розподіл зусиль у витках конічного різьбового з'єднання (ніпель із твердого сплаву):

- 1 – ніпель із твердого сплаву та сталева муфта;
- 2 – ніпель із твердого сплаву та алюмінієва муфта;
- 3 – ніпель із твердого сплаву та титанова муфта

Результати досліджень показали, що для всіх випадків наявність похибок виготовлення деталей викликає збільшення навантаження на перший та останній витки різьби, а також збільшення неоднорідності розподілу навантажень.

При чому, у середньому, наявність похибки по кроку збільшувало навантаження на перші два витки на 1%, наявність похибки за кутом – на 2%. Найбільш вагомий вплив здійснювало спільне поєднання похибок по кроку та за кутом: спостерігалось збільшення до 5% навантаження на перший та останній витки. Розподіл навантажень для випадків, коли ніпель був виготовлений із сталі суттєво відрізнявся для випадку, коли ніпель був виготовлений із твердого сплаву для всіх матеріалів муфт (сталь,

алюміній, титан). Так, для випадку, коли ніпель був виготовлений із сталі, спостерігалось приблизно симетричний розподіл навантаження відносно центрального витка; при чому найбільше навантаження спостерігалось на останній виток лише для випадку ніпель-сталь, муфта-сталь, для інших комбінацій матеріалів найбільше навантаження припадало на перші витки.

Для випадку, коли ніпель був виготовлений із твердого сплаву, розподіл навантаження не мав симетричного характеру, на перші витки припадало, практично, вдвічі більше навантаження, ніж на останні. Найбільш однорідний розподіл по витках конічної різьби спостерігався для випадку «Долото – сталь, замок – сталь». Найбільша неоднорідність в розподілі навантаження між витками спостерігалась для випадку «Долото – твердий сплав, замок – сталь». При цьому наявність похибок виготовлення викликає зменшення навантаження на другий виток, таким чином підвищується неоднорідність навантаження.

ВИСНОВКИ. Відповідно до результатів, отриманих вище можемо зробити такі висновки:

- в реальних умовах при виготовленні деталей спостерігається наявність усіх видів похибок, тому необхідно розглядати варіант їхньої сумісної дії;

- сумісна дія похибок викликає збільшення неоднорідності розподілу навантаження: зростає навантаження на перший виток, не суттєво знижуючись для всіх решти витків (окрім випадку «Долото – твердий сплав, замок – сталь», де зменшується навантаження тільки для другого витка);

- в середньому, розподіл навантаження між витками виглядає наступним чином для різних матеріалів: 20%:14%:10%:8%:7%:7%:7%:10%:15%, за виключенням випадку «Долото – твердий сплав, замок – сталь», де на останній виток припадає до 38% навантаження. Для випадку із циліндричної різьби розподіл навантаження між десятьма витками має вид: 34%: 22,7%: 15,1%: 11%: 6,8%: 4,5%: 3%: 2%: 1,3%: 0,9%. Бачимо, що відмінності між розподілами між витками циліндричної та конічної різьби полягають, найперше, у характері розподілу. Так, для конічної різьби характерний параболічний характер розподілу (максимальне навантаження припадає на перші і останні витки), а для циліндричної різьби характерним є гіперболічний розподіл (максимальне навантаження припадає тільки на перші витки). При чому, для конічної різьби характерною є більша нерівномірність розподілу: збільшення навантаження на останні витки досягається за рахунок зменшення навантаження на середні витки. Така відмінність може бути критичною, оскільки досить значне навантаження припадає на останні витки, що мають найменшу площу поперечного перерізу, тобто питоме навантаження є найбільшим для останніх витків конічної різьби, тоді як для циліндричної різьби найбільше питоме навантаження припадає тільки на перші витки.

- підвищення навантаження на перший найбільш навантажений виток може бути причиною зриву різьби і виходу з ладу з'єднання у цілому, особливо у випадку значних навантажень в процесі буріння;

- подальші дослідження слід проводити у напрямку підвищення рівномірності розподілу навантаження між витками різьби, змінюючи конструкцію з'єднання в цілому або окремі параметри різьби (наприклад шляхом нерівномірного кроку між витками різьби) або підвищенням якості виготовлення деталей з'єднання (наприклад, застосовуючи різьбошліфування).

ЛІТЕРАТУРА

1. Pryhorovska T. O. Study on rock reaction force depending on PDC cutter placement. *Machining Science and Technology*. 2017. Vol. 21. Iss. 1. PP. 36–66.
2. Копей Б. В., Михайлюк В. В. Розподіл навантажень по витках різьбового з'єднання насосних штанг. *Матеріали XVI науково-практичної конференції (09-14 квітня 2012 р.)*. Режим доступу: <http://nauka.zinet.info/16/kopey.php>.
3. Михайлюк В. В. Дослідження впливу конструктивних елементів нарізевих з'єднань насосних штанг на їх напружено-деформований стан. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. № 3. С. 100–105.
4. Копей Б. В., Михайлюк В. В., Бублінський Ю. Я. Попередження самовідвинчування різьб насосних штанг. *Нафтогазова енергетика*. 2014. № 1. С. 16–21. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nge_2014_1_3.
5. Курицын А. В., Куцевляк В. И., Кондратьев А. В. Конечно-элементарное моделирование взаимодействия винтового имплантата с костными тканями челюстного сегмента. *Вісник проблем біології і медицини: Український науково-практичний журнал*. 2014. № 2 Т.1. С. 202–207.
6. Максак В. И., Черепанов Д. Н., Цхай Э. Б. Распределение нагрузки в винтовом соединении с учетом шероховатости поверхности витков. *Вестник ТГАСУ*. 2012. № 1. С. 94–99.
7. Чуйко А. М., Угрин М. М. Аналіз зусиль у системі імплантат–кістка з урахуванням дискретних геометричних параметрів різьби і механічних властивостей кісткових тканин. *Новини стоматології*. 2016. № 4. С. 64–71.
8. Шацький І. П., Лисканич О. М., Корнута В. А. Умови сумісної деформації індикатора втомних пошкоджень із замковим з'єднанням бурильних труб. *IV міжнародна науково-технічна конференція „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування“*. Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2015. С. 94–97.
9. Venkatesan S., Kinzel G. L. Reduction of Stress Concentration in Bolt-Nut Connectors, *Journal of Mechanical Design*, 2006, Vol. 128, No. 6, 1337 p.
10. Satoshi Izumi, Takashi Yokoyama, Atsushi Iwasaki, Shinsuke Sakai. Three-dimensional finite element analysis of tightening and loosening mechanism of threaded fastener. *Engineering Failure Analysis*, 2005, 12(4), p. 604–615.
11. Роп'як Л. Я., Маквійчук М. В., Рогаль О. В. Теоретичне дослідження зміни кута підйому гвинтової лінії конічних різьб. *Резание и инструмент в технологических системах. Cutting & tool in technological system : междунар. науч.-техн. сб.* Харьков : НТУ "ХПИ", 2015. Вып. 85. С. 252–262.
12. Шанайда В., Склярів Р., Редько О. Аналіз геометричної моделі процесу фрезерування внутрішніх замкових різей. *Вісник ТНТУ Тернопіль* : ТНТУ, 2014. Том 74. № 2. С. 144–150. (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).

STUDY OF DETAIL MANUFACTURING ACCURACY INFLUENCE ON LOADING DISTRIBUTION AMONG CONICAL WIND TURNS

T. Pryhorovska, A. Velychkovych, L. Rop'yak

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
vul. Karpat'ska, 15, Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine. E-mail: pryhorovska@gmail.com

Purpose. The article aims to study detail manufacturing errors influence on loading distribution among conical wind turns for oil-gas equipment details. **Methodology.** A conical threaded is considered as a several times undefined system. Analytical forces in turns of the conical threaded connection are obtained. The study was based on one-dimensional models. **Results.** The follow combinations of nipple and clutch materials are considered: nipple (drill bit) – steel / hard alloy, clutch (tool joint) – steel; nipple (drill bit) – steel / hard alloy, clutch (tool joint) – aluminum; nipple (drill bit) – steel / hard alloy, clutch (tool joint) – titanium. It was determined the maximum load was observed for the first and last turns. Average load distribution among thread turns is as follows for different materials: 20%: 14%: 10%: 8%: 7%: 7%: 7%: 10%: 15%, except for the case "Drill bit - solid alloy, clutch - steel", where the last turn has up to 38% load. For a case with a cylindrical cut, the distribution of the load between the ten turns is as follows: 34%: 22.7%: 15.1%: 11%: 6.8% 4.5%: 3%: 2% 1.3% 0.9%. The combined effect of errors (step and conical angle) caused load distribution heterogeneity increasing: loading on the first and last turns increases, without significantly loading decreasing for all other turns. The differences between the distributions between the turns of the cylindrical and conical sections are, first of all, in the character of the distribution. Thus, for a conical section, the parabolic character of the distribution is characteristic (the maximum load is observed for the first and last turns), and for the cylindrical section is characterized by a hyperbolic distribution (the maximum load is observed for only on the first turns). Moreover, for a conical section, a greater uneven distribution is characteristic: an increase in the load on the last turns is achieved by reducing the load on the middle turns. Such a difference can be critical because a fairly significant load falls on the last turns having the smallest cross-sectional area, i.e, the specific load is the largest for the last turns of the conical section, whereas for the cylindrical section, the most specific load falls only on the first turns. **Originality.** The study was carried out to define stress distribution in real tread turns firstly. The manufacturing accuracy influence on loading distribution among conical tread

turns was studied. **Practical value.** The developed technique makes possible to analyze the work in the system of a conical threaded connection taking into account the discreteness of the geometric parameters of the thread and the mechanical properties of the joint parts.

Key words: cone thread, manufacturing errors, materials, drill bit, tool joint

REFERENCES

1. Pryhorovska, T. O. (2017) "Study on rock reaction force depending on PDC cutter placement", *Machining Science and Technology*, Vol. 21, Iss. 1, P. 36–66.
2. Kopey, B. V., Mykhailiuk, V. V. (2012) "Distribution of loads on the threads of the threaded connection of the pump rod" [Rozpodil navantazhen po vytkakh rizbovoho ziednannia nasosnykh shtanh], *Proceedings of the 16-th Scientific and Practical Conference* (April 9-14, 2012), available at: <http://nauka.zinet.info/16/kopey.php>
3. Mykhailiuk, V. V. (2015) "Investigation of the influence of structural elements of socket joints of pump rod on their stress-strain state" [Doslidzhennia vplyvu konstruktyvnykh elementiv narizevykh ziednan nasosnykh shtanh na yikh napruzhenno-deformovanyi stan], *Exploration and development of oil and gas fields*, No. 3, P. 100 - 105.
4. Kopei, B. V., Mykhailiuk, V. V., Bublinskyi, Yu. Ia. (2014) "Avoiding of self-aligning threading of pump rods" [Poperedzhennia samovidgvyinchuvannia rizb nasosnykh shtanh], *Oil and gas energetics*, No 1, P. 16-21, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nge_2014_1_3
5. Kurytsyn, A. V., Kutsevliak, V. Y., Kondratyev, A. V. (2014) "Finite elementary modeling of the interaction of a screw implant with bone tissues of the jaw segment" [Konechno-elementnoe modelyrovanye vzaymodeistvyia vyntovoho ymplantata s kostnyimi tkaniamy cheliustnogo sehmenta], *Bulletin of Problems of Biology and Medicine: Ukrainian Scientific and Practical Journal*, No. 2, Vol. 1, P. 202 – 207.
6. Maksak, V. Y., Cherepanov, D. N., Tskhai, E. B. (2012) "Distribution of load in a screw connection, taking into account the roughness of the surface" [Raspredelenye nahruzky v vyntovom soedynenyy s uchetom sherokhovatosti poverkhnosti vytkov], *Vestnyk THASU*, № 1, PP. 94–99.
7. Chuiko, A. M., Uhryn, M. M. (2016) "Analysis of efforts in the implant-bone system, taking into account discrete geometric parameters of thread and mechanical properties of bone tissues" [Analiz zusyly u systemi implantat–kistka z urakhuvanniam dyskretnykh heometrychnykh parametriv rizby i mekhanichnykh vlastyivostei kistkovykh tkanyn], *Dental news (Novyny stomatolohii)*, № 4, pp.64-71.
8. Shatskyi, I. P., Lyskanych, O. M., Kornuta, V. A. (2015) "Conditions of compatible deformation of the indicator of fatigue damage with locking connection of drill pipes" [Umovy sumisnoi deformatsii indykatora vtomnykh poshkodzen iz zamkovym ziednanniam burylnykh trub], *Proceedings of the IV International scientific and technical conference "Damage of materials during operation, methods of its diagnosis and forecasting"* (IV mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia „Poshkodzhennia materialiv pid chas ekspluatatsii, metody yoho diahnostuvannia i prohnozuvannia“). Ternopil, Ivan Puluy National Technical University, p. 94-97.
9. Venkatesan, S., Kinzel, G. L. (2006) Reduction of Stress Concentration in Bolt-Nut Connectors, *Journal of Mechanical Design*, Vol.128, No.6, p.1337.
10. Izumi, S., Yokoyama, T., Iwasaki, A., Sakai, S. (2005) Three-dimensional finite element analysis of tightening and loosening mechanism of threaded fastener, *Engineering Failure Analysis*, 12(4): p. 604-615.
11. Ropiak, L. Ya., Makoviichuk, M. V., Rohal, O. V. (2015) "Reduction of Stress Concentration in Bolt-Nut Connectors" [Teoretychne doslidzhennia zminy kuta pidiomu hvyntovoi linii konichnykh rizb. Rezanye y ynstrument v tekhnolohycheskykh systemakh], *Cutting & tool in technological systems*, Vol. 85, p. 252-262.
12. Shanaida, V., Skliarov, R., Redko, O. (2014) "Analysis of the geometric model of the milling process of internal casting chains" [Analiz heometrychnoi modeli protsesu frezeruvannia vnutrishnikh zamkovykh rizej], *Visnyk TNTU*, Volume 74, № 2. P. 144-150.

Стаття надійшла 11.02.2019.