

УДК 622.2

DOI: 10.31471/2304-7399-2025-21(79)-457-468

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ДВООПОРНОГО ЗАМКОВОГО РІЗЬБОВОГО З'ЄДНАННЯ ОБВАЖНЕНИХ БУРИЛЬНИХ ТРУБ

В. І. Артим , Б. А. Новосельський 

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: volodymyr.artym@nung.edu.ua

У статті представлено результати дослідження впливу температури на напружено-деформований стан згвинченого двоопорного замкового різьбового з'єднання обважнених бурильних труб. Встановлено, що температура суттєво впливає на геометричні параметри, точність посадок і міцність різьбових з'єднань, оскільки під дією теплових розширень змінюються сили затягування, що визначають герметичність та довговічність з'єднання. Для дослідження побудовано тривимірну модель двоопорного з'єднання типу NC50, у якій враховано дію градієнта температури (від 20°C усередині до 100°C ззовні) та момент згвинчування. Проведено моделювання у середовищі Solid Works Flow Simulation із подальшим експортом отриманих результатів у Simulation для визначення напружено-деформованого стану. Показано, що розподіл температури у з'єднанні є нерівномірним. Порівняльний аналіз розподілу еквівалентних напружень у впадинах витків ніпеля з урахуванням градієнта температури та моменту згвинчування показав як їх зростання, так і зниження відносно випадку дії лише моменту згвинчування на двоопорне ЗРЗ. Це підтверджує суттєвий вплив температурного поля на напружено-деформований стан з'єднання. Найбільше зменшення напружень спостерігається у перших та останніх витках ніпеля, що може сприяти підвищенню довговічності та втомної міцності різьбового з'єднання, водночас існує ймовірність погіршення його герметичності. Отримані результати узгоджуються з відомими експериментальними даними та підтверджують доцільність урахування термомеханічних факторів при розрахунку міцності бурильних колон. Використаний метод моделювання може бути адаптований для аналізу інших типів з'єднань нафтогазового обладнання, зокрема насосно-компресорних і обсадних труб, які працюють у високотемпературних умовах з метою їх подальшого вдосконалення для підвищення надійності, довговічності та безпеки експлуатації.

Ключові слова: бурильна колона, замкове різьбове з'єднання, напружено-деформований стан, напруження, витки різьби, температура.

Вступ. Температурний вплив на різьбові з'єднання відіграє ключову роль у забезпеченні їхньої надійності під час експлуатації. Під дією підвищених температур у матеріалах різьби відбуваються теплові розширення, які змінюють розміри окремих елементів з'єднання, впливаючи на характер посадок – зазорів або натягів. У результаті цього змінюються сили затягування, що визначають герметичність і міцність з'єднання.

Крім того, високі температури спричиняють пластичну деформацію поверхневих шарів різьби, особливо в місцях локального контакту, що може призвести до появи зазорів або ослаблення з'єднання. Теплова деградація матеріалів сприяє зношуванню поверхонь різьбових елементів, знижуючи їхню зносостійкість і тривалість служби. Для компенсації таких впливів у відповідальних різьбових вузлах застосовують збільшені допуски, посадки з зазором, а також методи посиленого затягування болтів і гвинтів аналогічно і у ЗРЗ. Це особливо важливо для з'єднань із натягом, де необхідно забезпечити стабільні значення крутного моменту.

Під час роботи з жароміцними та нержавіючими матеріалами діаметри отворів під різьбу спеціально збільшують, щоб врахувати можливі теплові деформації та забезпечити якісне формування різьби, що позитивно впливає на довговічність з'єднання.

Таким чином, температура впливає на геометричні параметри, міцність, точність посадки та експлуатаційні властивості різьбових з'єднань, тому її вплив необхідно враховувати на етапах проєктування, виготовлення та монтажу.

Наукова та практична цінність. Встановлено закономірності зміни розподілу еквівалентних напружень у різьбовій частині двоопорного різьбового з'єднання об'єднаних бурильних труб при сумісній дії температури та моменту згвинчування. Отримані результати можуть бути використані при розробленні та вдосконаленні конструкцій різьбових з'єднань бурильних труб, що працюють у високотемпературних умовах.

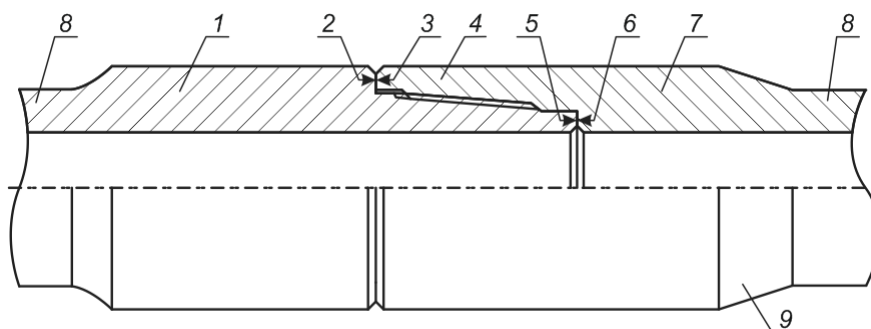
Формування цілей статті. Метою роботи є дослідження впливу температури на напружено-деформований стан згвинченого двоопорного замкового різьбового з'єднання об'єднаних бурильних труб.

Аналіз вітчизняних досліджень і публікацій

Замкові різьбові з'єднання (ЗРЗ) є невід'ємним елементом бурильної колони, яка складається з бурильних труб, перевідників, доліт, калібраторів та інших складових елементів. Конструкція ЗРЗ повинна забезпечувати надійне передавання осьових, згинальних і крутних навантажень, що виникають під час буріння, а також гарантувати герметичність та довговічність з'єднання.

У традиційній конструкції бурильних труб та об'єднаних бурильних труб найуразливішим елементом є замкові різьбові з'єднання.

Відомо, що коефіцієнт ефективності замка, який визначається, як відношення крутного моменту, що сприймає бурильна труба, до крутного моменту, який витримує замкове з'єднання, зазвичай становить 80-90%. Для підвищення цього показника, а також для забезпечення надійної роботи з'єднання за умов одночасного дії крутного моменту, розтягу та згину – тобто при характерних навантаженнях, у сучасній світовій практиці застосовують двоопорні замкові різьбові з'єднання (рис. 1).



1 – ніпель; 2 – опорний уступ ніпеля; 3 – опорний торець муфти; 4 – замкова різьба; 5 – опорний торець ніпеля; 6 – опорний уступ муфти; 7 – муфта; 8 – хвостовики ніпеля і муфти; 9 – конічний заплечник під елеватор
Рис. 1. Схема двоопорного замкового з'єднання

Двоопорне різьбове з'єднання складається з двох основних елементів. Зовнішня опора утворюється опорним уступом ніпеля 2 та опорним торцем муфти 3 і додатково виконує функцію герметизувальної поверхні з'єднання. Внутрішня опора, що формується опорним уступом муфти 6 та опорним торцем ніпеля 5, слугує механічним обмежувачем і додатковою поверхнею тертя, яка підвищує стійкість до дії крутних і згинальних моментів. Конструктивно такі з'єднання мають різьбу, аналогічну як у стандартних з'єднаннях, виконаних за специфікаціями API.

Одним із найвідоміших і найпоширеніших представників цього типу ЗРЗ є високомоментне з'єднання ТМК-TDS [1] (рис. 2).



Рис. 2. Приварний замок ТМК-TDS

Відмінною рисою конструкції цього ЗРЗ є наявність додаткової другої опори, яка починає працювати при підвищенні моменту згвинчування з'єднання. Завдяки цьому замок здатен сприймати крутні моменти, що на 35-70% перевищують показники стандартних одноопорних з'єднань. Конструкція різьбового профілю забезпечує сумісність із будь-яким стандартним буровим інструментом, а використання матеріалів високих груп міцності (G105, S135) сприяє подовженню терміну служби різьбової частини.

Компанія «DRILCO» також розробила два типи преміум-з'єднань бурових труб: SSDS та SSDS* (рис. 3). Згідно з даними виробника, ці високомоментні з'єднання забезпечують на 30-40% більшу стійкість до крутних навантажень порівняно зі стандартними з'єднаннями типу API [2].

Інше високомоментне двоопорне з'єднання преміум-класу цього виробника – ATDS (рис. 4) – характеризується здатністю сприймати на 50-55% більший крутний момент, ніж стандартні з'єднання за API [3].



Рис. 3. З'єднання типу SSDS

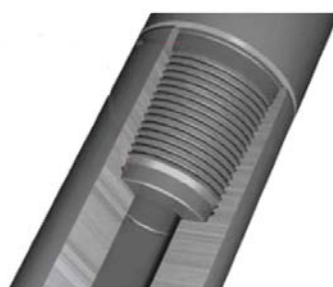


Рис. 4. З'єднання типу ATDS

Компанія NOV Grant Prideco® представила двоопорне з'єднання GPDST[™] (рис. 5), яке відрізняється покращеними експлуатаційними характеристиками порівняно зі стандартними API-з'єднаннями. Воно також сумісне зі звичайними буровими трубами [4].

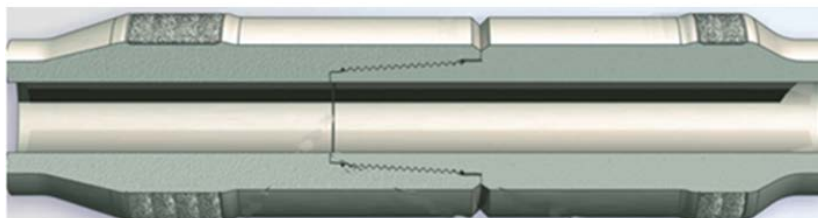


Рис. 5. Двоопорне з'єднання GPDST[™]

Вимоги до моменту згвинчування для ЗРЗ GPDST[™] ідентичні вимогам API, а оскільки додатковий торець виконує лише опорну функцію, незначні його пошкодження не впливають на працездатність

з'єднання. Такі конструкції забезпечують зростання допустимого крутного моменту на 20-50% порівняно зі стандартними API-з'єднаннями однакових розмірів.

На основі проведеного аналізу зарубіжних конструкцій двоопорних замкових з'єднань бурильних труб можна виділити такі їхні переваги порівняно зі стандартними з'єднаннями API:

- здатність витримувати більші моменти згинчування;
- передача підвищеного крутного моменту;
- вища стійкість до дії згинальних навантажень;
- зменшення ризику заклинювання з'єднання при максимальних крутних моментах;
- підвищена втомна міцність;
- ефективність при бурінні складнопрофільних свердловин із великою інтенсивністю набору кривизни;
- покращені гідравлічні властивості завдяки рівнопрохідному внутрішньому діаметру, що знижує опір потоку промивальної рідини та рівень турбулентності;
- сумісність і взаємозамінність зі стандартними одноопорними замковими з'єднаннями.

У статті [5] розглядається вплив положення основної площини різьби в замковому різбовому з'єднанні (ЗРЗ) елементів бурильної колони на розподіл напружень і деформацій у його конструктивних компонентах. Метою дослідження є оцінка того, як зміна геометричного розташування основної площини різьби впливає на напружено-деформований стан з'єднання та визначення критичних зон концентрації напружень, що можуть призводити до руйнування. Методика включає скінчено-елементне моделювання, яке дозволяє змоделювати різні варіанти розташування основної площини різьби й оцінити показники еквівалентних напружень та їх розподіл по витках ніпеля та муфти. Результати показують, що зміщення основної площини призводить до підвищеної концентрації напружень у першому витку різьби та в області муфти ближче до меншого торця ніпеля. Автори роблять висновок, що оптимальне розміщення різьби є значущим фактором для підвищення ресурсної надійності ЗРЗ, і рекомендують враховувати геометричне положення площини різьби при конструюванні та виготовленні з'єднань бурильної колони. Практичне значення роботи полягає у можливості підвищити довговічність та безпеку експлуатації бурильних колон за рахунок контролю геометрії різбового з'єднання.

Метою дослідження [6] є встановлення закономірностей розподілу температури й еквівалентних напружень у ЗРЗ бурильної труби, виконаному за стандартом API, при дії термічного та механічного навантаження. У експериментальній частині проведено вимірювання температурного поля та напружень у зразках з'єднань під час процесу згинчування-розгвинчування з різними значеннями крутного моменту і

швидкості монтажу. Паралельно проведено імітаційне моделювання. У результатах показано, що температура поверхні різьби та прилеглих елементів суттєво зростає в процесі її згвинчування-розгвинчування через тертя й контактні мікропереміщення; підвищення температури призводить до зменшення опору різьбового з'єднання. Автори ідентифікували критичні фактори: швидкість затягування, крутний момент, матеріал з'єднання, геометрія різьби. Праця має практичне значення для підвищення надійності бурильних колон: рекомендовано враховувати температурні ефекти при конструюванні, діяльності та виборі матеріалів/покриттів для різьбових з'єднань.

У роботі [7] проведено експериментальне дослідження герметичності різьбових з'єднань обсадних труб для нафтових і газових свердловин при підвищених температурних та тисках. Досліджено три типи з'єднань на трьох режимах: 50°C/21 МПа (низька температура – високий тиск), 350°C/21 МПа (висока температура – високий тиск) та 450°C/7 МПа (висока температура – низький тиск). Результати показують, що комбінація високої температури і високого тиску призводить до суттєво гіршої герметичності – з'єднання 511 демонструють витік більше ніж 2,5%, тоді як преміальні TPG2 – близько 0,6%. Авторами зроблено висновок, що температурно-тискова синергія є ключовим фактором погіршення герметичності в з'єднаннях.

У роботі [8] розглянуто вплив циклічного термічного навантаження на різьбові з'єднання обсадних колон, зокрема у свердловинах із термічними методами обробки (наприклад, CSS, SAGD) – коли температура підіймається понад ~200 °C. Автори вказують, що понад 80 % руйнувань верхніх частин обсадної колони спостерігаються саме в зонах з'єднань, і що головними механізмами є пластичні деформації, тріщини різьб і руйнування муфт.

Основний матеріал і результати. Для дослідження побудовано тривимірну модель двоопорного ЗРЗ. Основні розміри ЗРЗ наведені в ТУ 26-12-775-90 на замкові з'єднання для труби ОБТ HW I із різьбою NC50 (рис. 1).

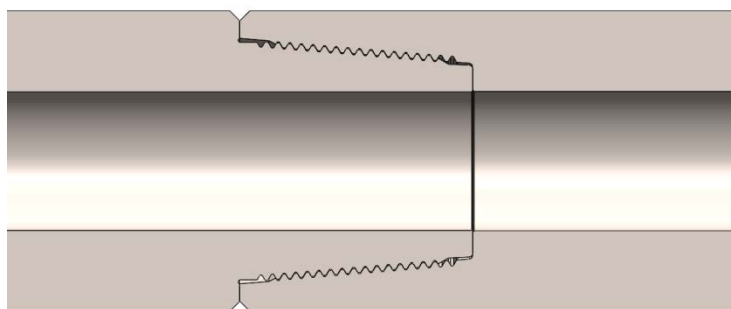


Рис. 6. Тривимірна модель двоопорного ЗРЗ

Розрахункову схему для дослідження розподілу температур у двоопорному ЗРЗ показано на рис. 7.

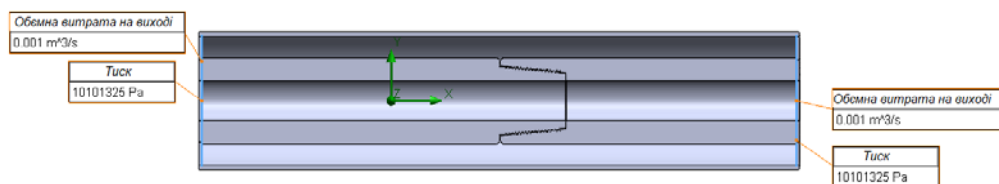


Рис. 7. Розрахункова схема

Граничними умовами прийнято: температура рідини всередині двоопорного ЗРЗ – 20 °С, ззовні ЗРЗ – 100 °С. Витрата рідини становить 0,001 м³/с.

Розподіл температури у трубі та двоопорному ЗРЗ показано на рис. 8.

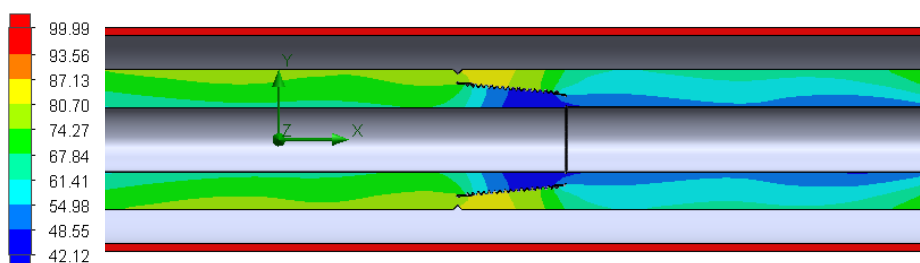


Рис. 8. Розподіл температури у тілі труби та двоопорному ЗРЗ

Отже, згідно рис. 8, розподіл температури у тілі труби та ЗРЗ є нерівномірним. Зниження температури у ЗРЗ відбувається із сторони упорного торця ніпеля до тіла муфти з 82 °С до 42 °С.

Для зручності розуміння отримуваних результатів імітаційного моделювання зазначимо напрямок та початок відліку впадин різьб ніпеля (рис. 9).

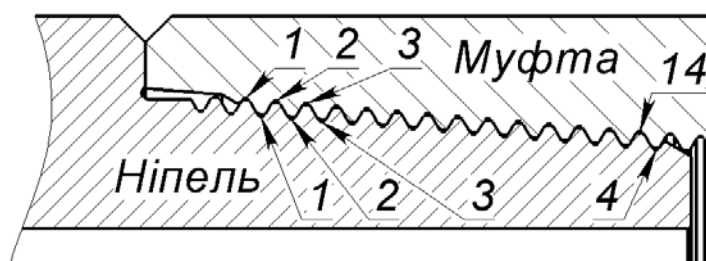
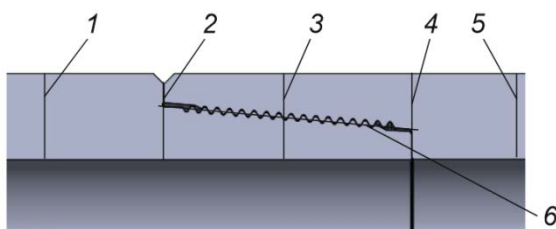


Рис. 9. Напрямки та початок відліку впадин різьб ніпеля та муфти

З метою побудови графічних залежностей розподілу температури у трубі та ЗРЗ на них виконано лінії (рис. 10).



1 – тіло труби; 2 – зовнішня опора; 3 – впадина сьомого витка ніпеля;
4 – внутрішня опора; 5 – тіло муфти; 6 – середній діаметр різьби
Рис. 10. Лінії для побудови графічних залежностей

На рис. 11 показано розподіл температури по поперечних перерізах труби та двопорного ЗРЗ (згідно рис. 10), а на рис. 12 – зміну температури по середньому діаметрі різьби двопорного ЗРЗ.

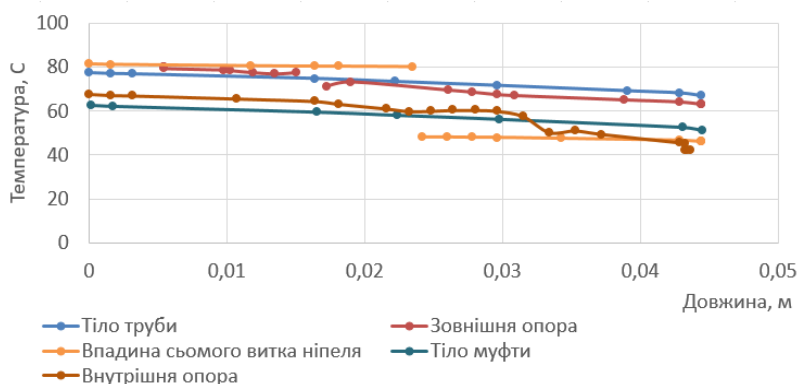


Рис. 11. Зміна температури по поперечних перерізах труби та двопорного ЗРЗ

Отже, виходячи з результатів поданих на рис. 11, у поперечних перерізах труби та двопорного ЗРЗ спостерігається зниження температури із 82 °С до 42 °С.

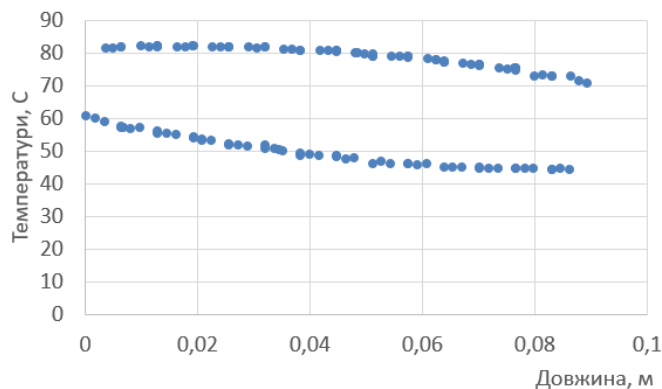


Рис. 12. Зміна температури по середньому діаметрі різьби ЗРЗ

Більш цікавою є зміна температури у двоопорному ЗРЗ по середньому діаметру різьби: вона спадає з 82 °С до 57 °С (рис. 12). Проте, у витках ніпеля ЗРЗ температура є нижчою від температури в муфті в середньому на 28%. Така відмінність між температурою у елементах двоопорного ЗРЗ призводить до різного розширення та відповідно впливає на напружено-деформований стан.

Розглянемо та порівняємо розподіл еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля при дії на двоопорне ЗРЗ тільки моменту згинчування та дії моменту згинчування сумісно із температурою. Результати дослідження нагрівання двоопорного ЗРЗ із модуля Flow Simulation експортовано як вхідне навантаження у модуль Simulation.

Оскільки різьбове з'єднання побудоване не по гвинтовій лінії, а як проточки, то для імітації моменту згинчування застосовано перекриття торців ніпеля та муфти. При моделюванні враховано коефіцієнт тертя у всіх елементах різьби – 0,1.

На рис. 13 показано розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі двоопорного ЗРЗ при дії моменту згинчування, а на рис. 14 – при дії моменту згинчування та температури.

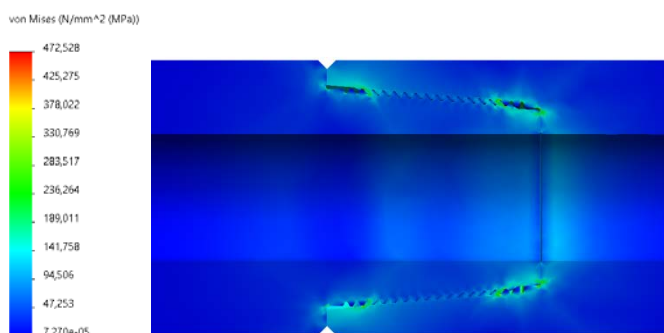


Рис. 13. Розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі двоопорного ЗРЗ при дії моменту згинчування

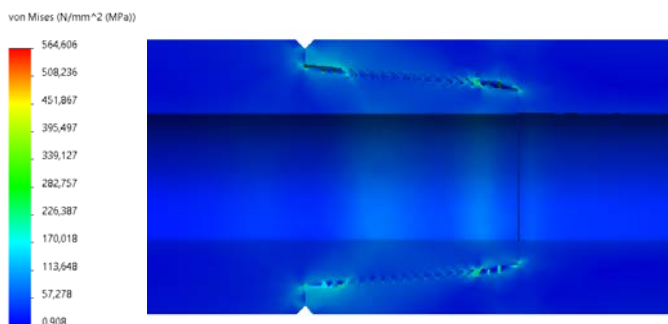


Рис. 14. Розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі двоопорного ЗРЗ при дії моменту згинчування та температури

З метою порівняння розподілу величин еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля при дії прикладених варіантів навантаження побудовано графічні залежності (рис. 15).

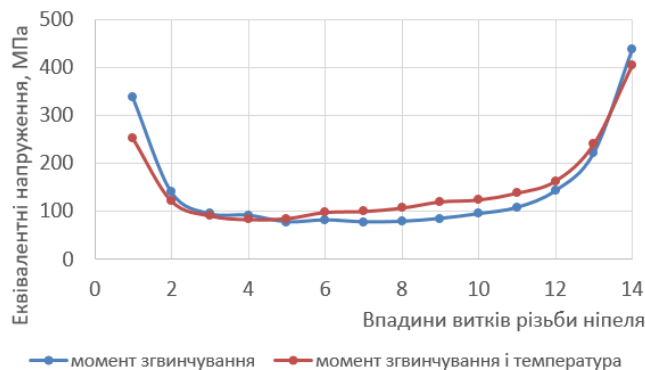


Рис. 15. Розподіл еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля

Виходячи з отриманих результатів імітаційного моделювання, нагрівання двоопорного ЗРЗ впливає на розподіл еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля. Зниження напружень відбувається у 1-4 впадинах витків ніпеля, зростання у 5-13, та знову зниження у 14 впадині, порівняно із розподілом напружень при дії на двоопорне ЗРЗ тільки моменту згинчування.

Зміна розподілу та величин еквівалентних напружень вплине на втомну міцність двоопорного ЗРЗ, визначення якої буде предметом подальших досліджень.

Висновок. Досліджено розподіл температур у двоопорному замковому різьбовому з'єднанні при нагріванні його буровим розчином до 20 °С всередині та 100 °С ззовні.

Встановлено напружено-деформований стан двоопорного ЗРЗ при дії моменту згинчування. При цьому враховано характеристики матеріалу та коефіцієнт тертя між елементами ЗРЗ. Отриманий розподіл напружень по впадинах витків різьби ніпеля узгоджується із відомими теоріями та попередніми дослідженнями. Найбільш навантаженими є декілька витків ніпеля як із сторони зовнішньої опори, так і внутрішньої.

Визначено напружено-деформований стан двоопорного ЗРЗ при дії моменту згинчування та температури. Порівняння розподілу еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля із урахуванням градієнта температури та моменту згинчування показало як їх зменшення, так і збільшення порівняно з випадком, коли до двоопорного ЗРЗ прикладається лише момент згинчування. Це свідчить про істотний вплив температури на напружений стан з'єднання. Зниження напружень відзначається у перших та останніх витках ніпеля, що може позитивно позначитися на довговічності та втомній міцності різьбового з'єднання, однак потенційно погіршити його герметичність.

Отримані результати доводять необхідність урахування температурних факторів під час оцінювання міцності ЗРЗ, тоді як визначення та аналіз втомної міцності становитимуть напрям подальших досліджень.

Література

1. Каталог продукції компанії ТМК Преміум [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://tmk-premium.tmk-group.ru/prem_zam_tds.
2. Каталог труб та послуг по трубній продукції компанії DRILCO – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.slb.com/-/media/files/smith/catalogs/tubulars-tubular-services-catalog.ashx>.
3. Каталог продукции компании Sumitomo Metals [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.tubular.nssmc.com/ru/product-services/octg/connection/list>.
4. Каталог продукції компанії NOV® GrantPrideco [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.nov.com/products/drill-pipe>.
5. Faflei O. Ya., Mykhailiuk V. V., Deineha R. O., Melnyk V. O., Shatan M. V., Pryhorovskyi O. V. Doslidzhennia vplyvu rozmishchennia osnovnoi ploshchyny rizby na napruzhenno-deformovanyi stan zamkovoho rizbovoho ziednannia elementiv burylnoi kolony. Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu. 2021. № 2(51). S. 66–72. URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2\(51\)-66-72](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-66-72).
6. Guangjie Y., Yao Z., Wang Q. Numerical and experimental distribution of temperature and stress fields in API round threaded connection // *Engineering Failure Analysis*. – 2006. – Vol. 13, No. 8. – P. 1275–1284. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2005.11.006.
7. Zhang T., Yang L., Bai F., Zhu C. Gas Tightness Evaluation of Threaded Connections for Deep Oil and Gas Wells at High Temperature // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, No. 17. – Article 4539. – DOI: 10.3390/en18174539.
8. Xie J., Tao G. *Analysis of Casing Connections Subjected to Thermal Cycle Loading*. – IMECHANICA / C-FER Technologies, 2010. – Available at: <https://imechanica.org/files/analysis-casing-connections-thermal-cycle-loading-2010.pdf>.

Стаття надійшла до редакційної колегії 03.11.2025 р.

Прийнято до друку 23.11.2025 р.

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE STRESS-STRAIGHTENING STATE OF A TWO-SUPPORT LOCKING THREADED CONNECTION OF WEIGHTED DRILL PIPES

V. I. Artym , B. A. Novoselskyi 

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;

76019, Ivano-Frankivsk, Karpatska St., 15;

e-mail: volodymyr.artym@nung.edu.ua

The article presents the results of a study of the effect of temperature on the stress-strain state of a screwed two-support lock threaded connection

of weighted drill pipes. It has been established that temperature significantly affects the geometric parameters, fit accuracy, and strength of threaded connections, since thermal expansion changes the tightening forces that determine the tightness and durability of the connection. For the study, a three-dimensional model of an NC50 double-support connection was constructed, which takes into account the effect of the temperature gradient (from 20 °C inside to 100 °C outside) and the tightening torque. Modeling was performed in Solid Works Flow Simulation with subsequent export of thermal loads to Simulation to determine the stress-strain state. It was shown that the temperature distribution in the connection is uneven. A comparative analysis of the distribution of equivalent stresses in the recesses of the nipple coils, taking into account the temperature gradient and the tightening torque, showed both their increase and decrease relative to the case of only the tightening torque acting on a two-support ZRZ. This confirms the significant influence of the temperature field on the stress-strain state of the connection. The greatest reduction in stresses is observed in the first and last threads of the nipple, which can contribute to an increase in the durability and fatigue strength of the threaded connection, but at the same time there is a possibility of deterioration in its tightness. The results obtained are consistent with known experimental data and confirm the feasibility of taking thermomechanical factors into account when calculating the strength of drill strings. The modeling method used can be adapted to analyze other types of oil and gas equipment connections, in particular pump and compressor pipes and casing pipes operating in high-temperature conditions, with a view to further improving them to increase reliability, durability, and operational safety.

Keywords: *drill string, lock threaded connection, stress-strain state, stress, thread turns, temperature.*