

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавра

на тему

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ ТОРЦЕВОГО
МЕХАНІЧНОГО УЩІЛЬНЕННЯ З ПАРОЮ ТЕРТЯ
«СТАЛЬ-ПТФЕ КОМПОЗИТ»**

Виконав: студент 4 курсу групи КМ – 01-2
Косоков Р.В.

Рівень підготовки: бакалавр

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

ОПП: Комп'ютерний інжиніринг в
механіці

Керівник: доцент Гудков С.М.

Рецензент: зав. кафедри Загорулько А.В.

Суми – 2024

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра: с.42, рис.18, таб.2, дж.23.

Об'єкт дослідження: торцеве механічне ущільнення з парою тертя «Сталь-ПТФЄ композит».

Мета: числове розв'язання задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЄ-композит».

Методи дослідження: аналіз і узагальнення даних джерел науково-технічної інформації; числовий розрахунок, виконаний на основі залежностей теорії пружності та гідроаеромеханіки, що дозволило вирішити задачу гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЄ-композит».

ПТФЄ-композити мають низький коефіцієнт тертя, можуть використовуватися в широкому діапазоні температур, мають високу хімічну стійкість. Під час механічної обробки ПТФЄ-композитів виникає до 50% відходів у вигляді стружки від початкової маси, що може спричинити екологічні проблеми, які пов'язані з великою кількістю неутилізованих відходів. Тому використання ПТФЄ-композитів з наповнювачем із вторинної фторполімерної сировини дозволяє зменшити витрати на початкову сировину.

В роботі проведено числовий розрахунок задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЄ-композит з наповнювачем із вторинної фторполімерної сировини». Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів числового розрахунку задачі гідропружності для різних матеріалів в залежності від ущільнювального тиску.

ТОРЦЕВЕ УЩІЛЬНЕННЯ, САЛЬНИКОВЕ УЩІЛЬНЕННЯ, ПТФЄ,
ГІДРОПРУЖНОСТІ, ANSYS STUDENT

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Антифрикційні матеріали на основі політетрафторетилену	9
1.1 Антифрикційні властивості ПТФЕ.....	9
1.2 Утилізація полімерних матеріалів.....	10
1.3 Використання ПТФЕ в якості ущільнювальних матеріалів для торцевих механічних ущільнень.....	12
1.4 Висновки.....	15
2. Числовий розрахунок задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення.....	16
2.1 Конструкція та принцип роботи торцевого сальникового ущільнення.....	16
2.2 Вихідні дані та послідовність числового розрахунку задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення.....	18
2.3 Результати розрахунку.....	22
2.4 Висновки.....	27
3. Числовий розрахунок задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-композит».....	28
3.1 Торцеві механічні ущільнення.....	28
3.2 Вихідні дані для числового розрахунку задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-композит».....	30
3.3 Результати розрахунку та порівняльний аналіз отриманих результатів	34
3.4 Висновки.....	37
Висновки.....	38
Перелік посилань.....	40

ВСТУП

Приблизно 70% поломок відцентрових насосів пов'язано із виходом з ладу ущільнень [1]. Вихід з ладу ущільнення призводить до великих економічних витрат через втрату перекачувального середовища та простою, а також призводить до забруднення навколишнього середовища, та завдає шкоди здоров'ю людини. У більшості сучасних відцентрових насосів загальнопромислового призначення в якості кінцевих ущільнень використовуються торцеві ущільнення. Проте в умовах відносно малих значень показника PV ($PV < 10 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$) використання торцевих ущільнень є економічно не доцільним. Це призводить до того, що необхідно використовувати нові більш дешевші матеріали кілець пари тертя торцевого ущільнення за умови збереження довговічності ущільнення в цілому. К таким матеріалам відноситься ПТФЕ-композит [2].

ПТФЕ-композити мають низький коефіцієнт тертя, можуть використовуватися в широкому діапазоні температур, мають високу хімічну стійкість. Під час механічної обробки ПТФЕ-композитів виникає до 50% відходів у вигляді стружки від початкової маси, що може спричинити екологічні проблеми, які пов'язані з великою кількістю неутилізованих відходів.

Сучасна промисловість випускає десятки тисяч марок наповнених полімерних композитів. Властивості термопластичних композитних матеріалів визначаються властивостями полімерної матриці та наповнювачів, співвідношенням їх вмісту у композиції, характером розподілу наповнювача у матриці, природою взаємодії на межі розділу матриця-наповнювач. При цьому саме технологія отримання ПТФЕ-композиту дозволяє наблизити його реальну структуру до теоретичної, гарантуючи необхідні експлуатаційні властивості.

Під час механічної обробки ПТФЕ-композитів виникає до 50% відходів у вигляді стружки від початкової маси, що може спричинити екологічні проблеми, які пов'язані з великою кількістю неутилізованих відходів.

Одним із шляхів утилізації полімерних матеріалів є їх переробка, що дозволяє повернути у сферу споживання певну частину матеріалів без значних енергетичних і матеріальних втрат. Це пов'язано із зростаючим дефіцитом первинної сировини. Використання вторинних фторполімерів в якості наповнювача для ПТФЕ композитів є перспективним та дозволяє підвищити його фізико-механічні та експлуатаційні властивості та зменшити витрати на початкову сировину.

На сьогоднішній день для розрахунку торцевих ущільнень застосовуються наближені методи розрахунку, які не дають можливості точно проаналізувати вплив різних матеріалів ущільнювальних кілець на гідродинамічні характеристики ущільнення. Тому необхідно застосовувати сучасні програмні комплекси, в яких закладено методи обчислювальної гідродинаміки.

Тому метою роботи є числове розв'язання задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ композит».

Для вирішення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі

1. Аналіз і узагальнення даних науково-технічної літератури за темою роботи.

2. Числовий розрахунок задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення та торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ композит» для різних початкових умов.

3. Порівняльний аналіз отриманих результатів числового розрахунку визначення меж застосування торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-композит».

Об'єкт дослідження – торцеве механічне ущільнення з парою тертя «Сталь-ПТФЕ композит».

Предмет дослідження – гідродинамічні характеристики торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-композит».

Методи дослідження: аналіз і узагальнення даних джерел науково-технічної інформації; числовий розрахунок, виконаний на основі залежностей теорії пружності та гідроаеромеханіки, що дозволило вирішити задачу

гідропружності торцеве механічне ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-композит».

Дипломна робота складається з вступу трьох розділів, висновків, переліку посилань. Перший розділ присвячений аналізу і узагальненню даних науково-технічної літератури за темою роботи. Другий розділ присвячений числовому розрахунку задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення в залежності від ущільнювального тиску. Третій розділ присвячений числовому розрахунку задачі гідропружності торцеве механічне ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-композит» в залежності від ущільнювального тиску та порівняльному аналізу отриманих результатів.

1. АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ПОЛІТЕТРАФТОРЕТИЛЕНУ

1.1 Антифрикційні властивості ПТФЕ

Композитні матеріали на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) (фторопласту-4, тефлону) використовуються для виготовлення деталей високонавантажених вузлів тертя [3,4]. ПТФЕ має чудові фізико-механічні та хімічні властивості, такі як хімічна інертність, низький коефіцієнт тертя, нетоксичний, негорючий, незначне водопоглинання, антипригарність, висока термостабільність, низька діелектрична проникність, помірні механічні властивості та сумісність зі з'єднанням з металами і неорганічними пігментами. ПТФЕ володіє найбільш низьким коефіцієнтом тертя (0,01–0,04) в умовах сухого тертя в порівнянні з іншими полімерами. Проте ПТФЕ має і негативні властивості такі, як низька зносостійкість, низька теплопровідність, низька несуча здатність та низький опір стиску [5]. Тому для покращення властивостей ПТФЕ виконують їх модифікацію. Модифікація полімерів полягає в зміні їх фізико-хімічних та механічних властивостей. Для цього використовують різні наповнювачі [6].

Цей підхід дозволяє значно підвищити зносостійкість ПТФЕ. Позитивний вплив додавання наповнювачів до ПТФЕ з метою поліпшення триботехнічних характеристик полягає у декількох факторах. Ослаблення міжмолекулярних зв'язків в полімері та формування оптимальної структури матеріалу відбуваються через участь наповнювачів під час тертя, вони виступають як інгібітори. Це призводить до підвищення працездатності плівки фрикційного переносу. У сучасній практиці триботехнічного матеріалознавства для ПТФЕ доступно багато потенційних наповнювачів. Вони можуть бути органічного або неорганічного походження та відрізнятися формою, розмірами, концентрацією, станом поверхні та розподілом в матриці. Для поліпшення експлуатаційних властивостей широко використовують як дисперсні, так і

волокнисті наповнювачі. Вплив наповнювачів на властивості полімерних матеріалів визначається їхньою взаємодією з матрицею та самими властивостями наповнювачів. Пошук оптимальної технології поєднання компонентів наповненої системи визначається конструкцією та призначенням вузла тертя. Результати досліджень показують, що для значного поліпшення характеристик полімерних композитів необхідно додавати не менше 20 % наповнювача [7].

Для більш глибокого розуміння впливу наповнювачів на структуру та властивості полімерних композитів, важливо розглянути процеси, які відбуваються на рівні молекулярної та надмолекулярної організації матеріалу. Зміни у структурі полімеру в поверхневих шарах під час тертя супроводжуються переорієнтацією, аморфізацією, руйнуванням та рекомбінацією окремих молекул та структурних утворень. Ці процеси можуть відбуватися під впливом механічних, термічних та інших чинників, що спричиняються дією наповнювачів на матрицю. Крім того, важливо врахувати, що оптимальний склад композиції може варіюватися в залежності від типу та умов роботи вузла тертя [7].

1.2 Утилізація полімерних матеріалів

В сучасному світі спостерігається безперервне зростання виробництва полімерів, зокрема ПТФЕ, які використовуються в усіх галузях промисловості. Збільшення виробництва ПТФЕ супроводжується збільшенням їх виробничих відходів. Станом на сьогодні існують великі ризики щодо безпечної утилізації ПТФЕ та пов'язаних з ними продуктів і виробів наприкінці їх життєвого циклу. Це обумовлено їх негативним впливом на людини та навколишнє середовище. Тому, в країнах з високими показником виробництва ПТФЕ цьому питанню приділяється велика увага [8, 9].

Останнім часом виробництво та використання полімерів в країнах з високим рівнем їх використання знаходяться під посиленним контролем відповідних регулюючих органів. Для оцінки впливу полімерних речовин на людей та навколишнє середовище розроблені відповідні методики та програми. У 2019 році Європейський центр екотоксикології та токсикології хімічних речовин (ЕСЕТОС) розробив концептуальну основу для оцінки ризику полімерів («CF4Polymers») [10]. CF4Polymers визначає основні елементи, які слід враховувати при оцінці потенційних екологічних небезпек і ризиків для здоров'я людини, пов'язаних із полімерними речовинами. В роботі [11] запропонована концепція полімерів низького рівня ризиків PLC (polymers of low concern). На відміну від концепції PLC, CF4Polymers враховує конкретні етапи життєвого циклу полімерних виробів і пов'язані з ними шляхи впливу [8]. Концепція PLC заснована на характеристиках речовин та виробів, але не охоплює проблеми, що виникають під час виробництва та утилізації. Таким чином, конкретні вироби з фторполімеру технічно можуть відповідати визначенню PLC, але все одно становити значні проблеми для здоров'я людини та навколишнього середовища через викиди, що відбуваються протягом життєвого циклу (рис. 1.1). Добре відомим випадком, коли це відбувається, є вивільнення допоміжних речовин під час виробництва деяких фторполімерів, зокрема ПФТЕ [8,11].

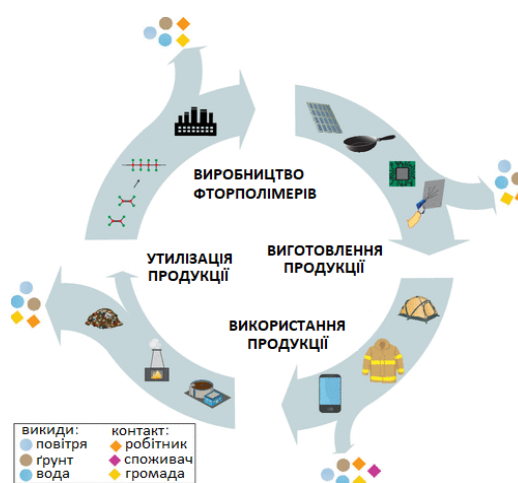


Рисунок 1.1 – Концептуальна діаграма викидів під час виробництва фторполімерів, виготовлення та утилізації продукції

На рисунку 1.2 зображена схема життєвого циклу ПТФЕ. Під час механічної обробки ПТФЕ-композитів виникає до 50% відходів у вигляді стружки від початкової маси, що може спричинити екологічні проблеми, які пов'язані з великою кількістю неутилізованих відходів.

Одним із шляхів утилізації полімерних матеріалів є їх переробка, що дозволяє повернути у сферу споживання певну частину матеріалів без значних енергетичних і матеріальних втрат [12]. Це пов'язано із зростаючим дефіцитом первинної сировини. Використання вторинних фторполімерів в якості наповнювача для ПТФЕ композитів є перспективним та дозволяє підвищити фізико-механічні та експлуатаційні властивості. Найбільш простим методом модифікації ПТФЕ є використання механохімічних та термомеханічних процесів при підготовці інгредієнтів ПТФЕ композиту [12,13].

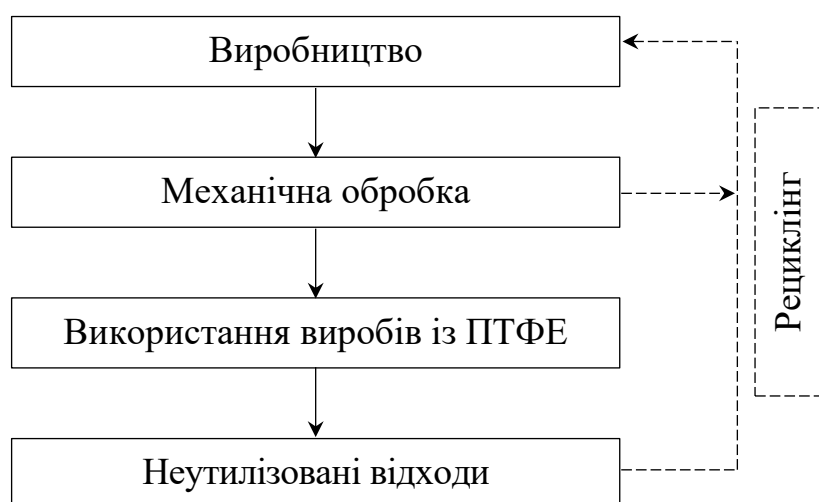


Рисунок 1.2 – Життєвий цикл ПТФЕ

1.3 Використання ПТФЕ в якості ущільнювальних матеріалів для торцевих механічні ущільнення

Ущільнювальні елементи з ПТФЕ знаходять застосування в різних галузях промисловості, включаючи нафтогазову, хімічну, харчову та фармацевтичну промисловості. Вони використовуються в нафтопроводах, насосах, компресорах, реакторах та іншому обладнанні для запобігання витіку

шкідливих речовин і забезпечення безпеки та ефективності роботи. Більш детальне використання описане в таблиці 1.1 [14].

Таблиця 1.1 – Галузі, властивості та промислове застосування фторполімерів

Галузь	Необхідні характеристики	Застосування
Хімічна промисловість	Хімічна стійкість, хороші механічні властивості, термічна стабільність, криогенні властивості	Прокладки, вкладиші, насоси, клапани та вкладиші труб, трубки, покриття, компенсатори/сильфони, теплообмінники
Електротехнічна промисловість	Низька діелектрична проникність, вогнестійкість, термічна стабільність, низькі показники заломлення	Провід і кабель ізоляція, з'єднувачі, оптичні волокна, друковані плати
Автомобілебудування Авіаційна промисловість	Низький коефіцієнт тертя, хороші механічні властивості, криогенні властивості, хімічна стійкість, низькі проникні властивості	Ущільнювачі, кільця ущільнювачів, шланги в автомобільних гідропідсилювачах керма, трансмісіях і кондиціонерах, підшипниках, датчиках систем управління паливом.
Покриття	Теромстійкість, хімічна стійкість	Покриття посуду, покриття металевих поверхонь, порошкові покриття
Медицина	Стабільність, чистота, відмінні механічні властивості, хімічна стійкість	Серцево-судинні трансплантати, серцеві пластирі, пакувальні плівки для заміни зв'язок для медичних виробів
Архітектурне тканинне та плівкове застосування	Відмінна атмосферостійкість, вогнестійкість, прозорість	Тканини та плівки з покриттям для будівель/дахів, передні/задні плівки для сонячної енергетики

Галузь	Необхідні характеристики	Застосування
Полімерні добавки	Низький коефіцієнт тертя, вогнестійкість, стійкість до стирання, антипригарні властивості	Обробка поліолефінами для уникнення поверхневих дефектів і для більш швидкої обробки. Добавки для чорнила, покриттів, мастил, протикрапельних засобів
Напівпровідникова промисловість	Хімічна стійкість, висока чистота, антиадгезія, ізоляція, термостійкість	Технологічні поверхні вафельних носіїв, трубок, запірної арматури, насосів і арматури, накопичувальних ємностей
Перетворення/ зберігання енергії Відновлювані джерела енергії	Хімічна/термічна стійкість, транспортування іонів, висока атмосферостійкість, висока прозорість, корозійна стійкість	Сполучна речовина для електродів, сепараторів, іоноселективних мембран, прокладок, мембранних армувань, плівок для фотоелектричних покриттів для лопатей вітряків

Правильне поєднання матеріалів кілець є ключовою умовою ефективної роботи торцевих механічних ущільнень, які використовуються для герметизації роторів відцентрових машин. Правильне поєднання матеріалів забезпечує надійність, довговічність, герметичність ущільнювального вузла. ПТФЕ є одним з найбільш ефективних матеріалів у цій сфері.

ПТФЕ має кілька ключових характеристик, які роблять його відмінним вибором для торцевих ущільнень. Перш за все, його хімічна стійкість дозволяє використовувати його з різними рідинами і газами, включаючи агресивні середовища. Крім того, висока термічна стійкість ПТФЕ робить його придатним для використання в широкому температурному діапазоні, від низьких до дуже високих температур. Низький коефіцієнт тертя ПТФЕ

дозволяє зменшити знос та тертя ущільнювальних поверхонь, що забезпечує довговічність та надійність ущільнення.

Використання ПТФЕ у ролі ущільнювального матеріалу має численні переваги. Це надійний матеріал, який забезпечує високу стійкість до агресивних середовищ, має довгий термін служби та низький рівень тертя, що дозволяє знизити енергоспоживання та витрати на обслуговування обладнання.

З розвитком технологій виробництва та обробки матеріалів можна очікувати подальшого вдосконалення торцевих ущільнень з ПТФЕ, зокрема, зменшення їх розмірів, підвищення міцності та герметичності. Крім того, можливе розроблення нових методів обробки ПТФЕ для підвищення його властивостей і розширення області застосування ущільнювальних пристроїв.

1.4 Висновки

ПТФЕ-композити мають низький коефіцієнт тертя, можуть використовуватися в широкому діапазоні температур, мають високу хімічну стійкість. Під час механічної обробки ПТФЕ-композитів виникає до 50% відходів у вигляді стружки від початкової маси, що може спричинити екологічні проблеми, які пов'язані з великою кількістю неутилізованих відходів. Одним із шляхів утилізації полімерних матеріалів є їх переробка, що дозволяє повернути у сферу споживання певну частину матеріалів без значних енергетичних і матеріальних втрат. Використання ПТФЕ-композитів з наповнювачем із вторинної фторполімерної сировини дозволяє зменшити витрати на початкову сировину. Одним із можливих варіантів використання ПТФЕ-композитів, є використання їх в якості матеріалів для кілець торцевих ущільнень, які використовуються для герметизації роторів відцентрових машин загальнопромислового призначення.

2. ЧИСЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ЗАДАЧІ ГІДРОПРУЖНОСТІ ТОРЦЕВОГО САЛЬНИКОВОГО УЩІЛЬНЕННЯ

2.1 Конструкція та принцип роботи торцевого сальникового ущільнення

Торцеві сальникові ущільнення відносяться до класу контактних ущільнень і являє собою механічний торцеве ущільнення, в якому одне з кілець замінено сальниковою набивкою [15]. Таке ущільнення застосовується в діапазоні від 0 до 1,5 МПа має низку переваг: простота і дешевизна вузла ущільнення, висока герметичність і довговічність. На рисунку 2.1 представлена традиційна конструкція торцевого сальникового ущільнення, що складається з розташованого в корпусі 4 кільця сальникової набивки 3, яке як і в механічному торцевому ущільненні підтискається до аксіально-рухої втулці 1 пружним елементом 2.

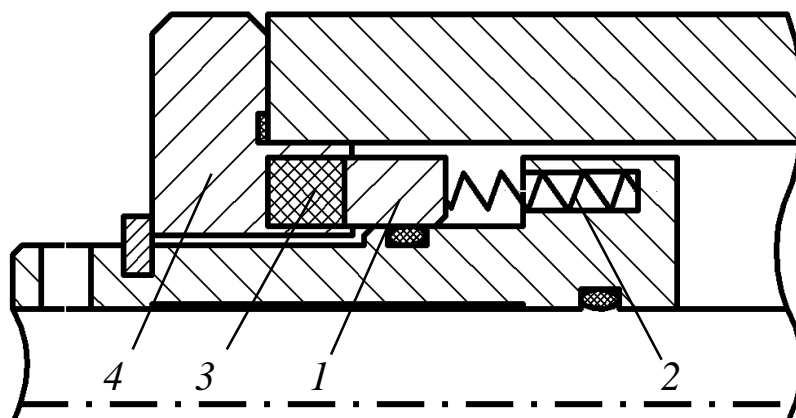


Рисунок 2.1 – Традиційна конструкція торцевого сальникового ущільнення

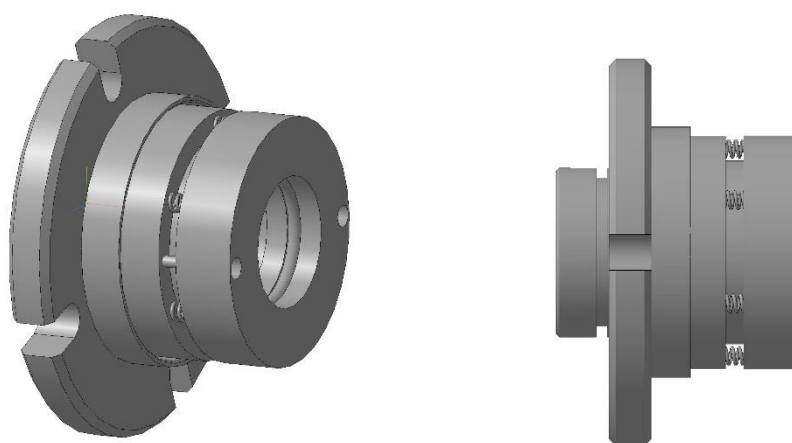


Рисунок 2.2 – 3d модель торцевого сальникового ущільнення

Перерахуємо найважливіші особливості торцевих сальникових ущільнень.

1. Пару тертя, як і в радіальних сальниках, утворюють тверда металева та м'яка пружно-пластична поверхні.

2. Як і в механічних торцевих ущільненнях поверхньою, що обертається, може бути як тверда, так і м'яка поверхня.

3. У торцевому сальниковому ущільненні використовується одне кільце сальникової набивки, і вплив сили тертя на контактний тиск дуже мало.

4. Зменшена площа тертя і найкраще тепловідведення дозволяють торцевим сальниковим ущільненням надійно працювати з вищими показниками навантаженості PV , з малими, близькими до краплинних витоків і з підвищеним, порівняно з радіальними сальниками, ресурсом.

5. Суттєво покращені теплові характеристики дозволяють створювати уніфіковані патронного типу конструкції торцевого сальникового ущільнення для широкого діапазону робочих параметрів.

6. При необхідності торцеві сальникові ущільнення можуть використовуватись як подвійні.

7. Оскільки одна з контактних поверхонь - м'яка набивка, відповідають вимоги прецизійної обробки пар тертя, обов'язкові для торцевих механічних ущільнень, для яких допустима неплоскостність не більше 0,9 мкм.

8. Торцеві сальникові ущільнення мало чутливі до пружних деформацій елементів конструкції.

9. Як і в механічних торцевих ущільненнях опорне кільце та (або) втулка з сальниковою набивкою мають свободу осьових та кутових переміщень, здатних компенсувати можливі технологічні та експлуатаційні неспіввідності.

10. Антифрикційне просочення сальникової набивки зменшує швидкість зношування опорного кільця, і воно може виготовлятися із звичайних конструкційних сталей.

11. У торцевому сальниковому ущільненні зношування опорного кільця не впливає на герметичність вузла, а величина зношування практично не лімітується.

12. Заміна пошкодженого кільця сальникової набивки не вимагає від'єднання насоса від приводу, що призводить до порушування центрування агрегату.

13. За техніко-економічними показниками (витоки, ресурс, втрати на тертя, витрати сальникової набивки) торцеві сальникові ущільнення перевищують радіальні, а їх вартість та експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж механічних торцевих ущільнень.

Незважаючи на всі ці переваги, торцеві сальникові ущільнення мають недоліками. Головним недоліком торцевого сальникового ущільнення є те, що через нерівномірність розподілу контактного тиску по радіусу пари тертя воно досить перевантажено [16]. Це призводить до того, що вся ширина пари тертя торцевого сальникового ущільнення розділена на дві ділянки. Ділянка контакту, яка відіграє основну роль герметизатора (найбільш перевантажена ділянка) і ділянка зазору між сальниковою набивкою і опорним диском, на якій розподіляється гідростатичний тиск. У зв'язку з цим необхідно застосовувати відповідні конструктивні заходи з розвантаження пари тертя або використання нових матеріалів, забезпечуючи при цьому роботу ущільнення в режимі змішаного змащення з мінімальними коефіцієнтами тертя і мінімальними витоками.

2.2 Вихідні дані та послідовність числового розрахунку задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення

Розрахунок торцевого сальникового ущільнення зводиться до вирішення задачі гідропружності, що дозволяє вирішити задачу взаємного впливу рідини та контактуючих з нею кілець ущільнення. Вирішення такої задачі дуже складно, оскільки зводиться до спільного розв'язання рівнянь теорії пружності та гідромеханіки. Тому для вирішення задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення необхідно застосовувати чисельні методи, реалізовані в сучасних програмних комплексах, які дозволяють вирішувати міждисциплінарні задачі.

Це завдання вирішувалося з допомогою універсального програмного комплексу ANSYS Student, у якому реалізований зв'язок між аналізом напружено-деформованого стану і гідродинамічним розрахунком завдяки технології Fluid-Structure Interaction (FSI) [17]. Алгоритм задачі FSI полягає в ітеративному розв'язанні задач для деформованого тіла та області течії з використанням вирішувачів ANSYS Structural і CFX (рис.2.3).



Рисунок 2.3 – Схема взаємодії вирішувачів ANSYS Structural і CFX

На рисунку 2.4 представлено проєкт розрахунку задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення в програмному комплексі ANSYS Student.

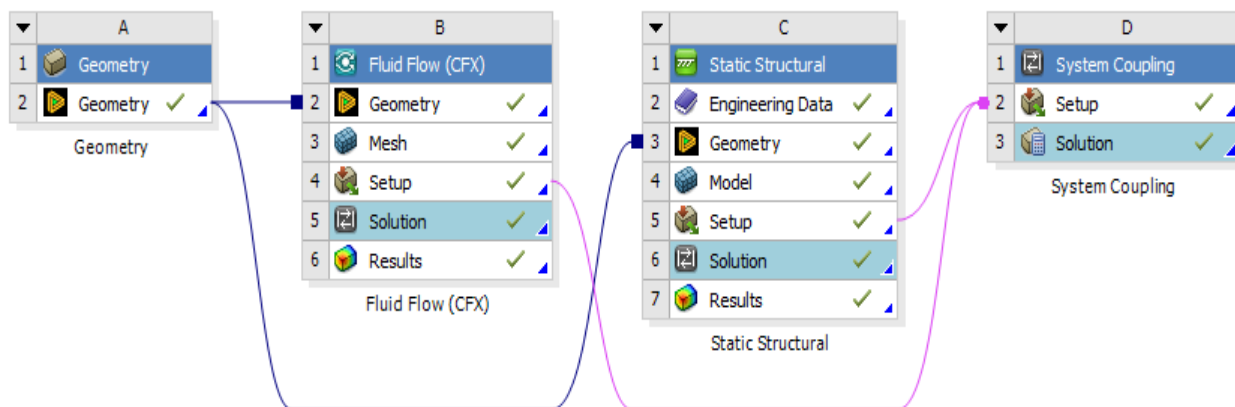


Рисунок 2.4 – Проєкт розрахунку задачі гідропружності в програмному комплексі ANSYS Student

На рисунку 2.5 представлена розрахункова схема торцевого сальникового ущільнення, яка для спрощення розрахунку представлена у вигляді сектора геометрії кілець ущільнення з кутом 1° .

Для розрахунку приймалися такі геометричні розміри ущільнення:

- $r_1 = 45$ мм - зовнішній радіус набивання;

- $r_2 = 35$ мм - внутрішній радіус набивання;

- $r_3 = 44,5$ мм - зовнішній радіус опорного кільця;

- $r_4 = 35,5$ мм - внутрішній радіус опорного кільця.

Модуль пружності сальникової набивки - 50 МПа;

коефіцієнт Пуассона сальникової набивки - $0,4$.

Ущільнювальний тиск – $0,2; 0,4$; МПа

Розрахунок виконувався з урахуванням зусиль від натискної втулки.

На початку розрахунку зазор області течії обирався постійним та дорівнював середньої шорсткості контактуючих поверхонь. Для гідродинамічного розрахунку задавалися граничні умови періодичної симетрії, відкриті умови входу і виходу, що дозволяють в процесі виконання завдання втікати і витікати потоку із зазору торцевого сальникового ущільнення, ущільнюючий тиск p_1 та надлишковий тиск рідини на виході із ущільнення, який дорівнював 0 Па. Частота обертання валу не враховувалася.

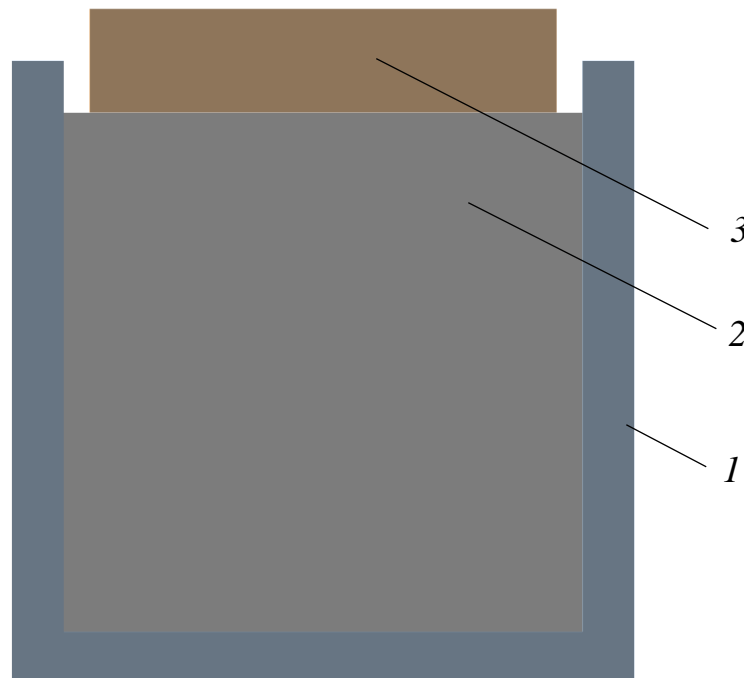


Рисунок 2.5 – Розрахункова схема торцевого сальникового ущільнення:

1 – корпус, 2 – сальникова набивка, 3 – аксіально-рухома втулка

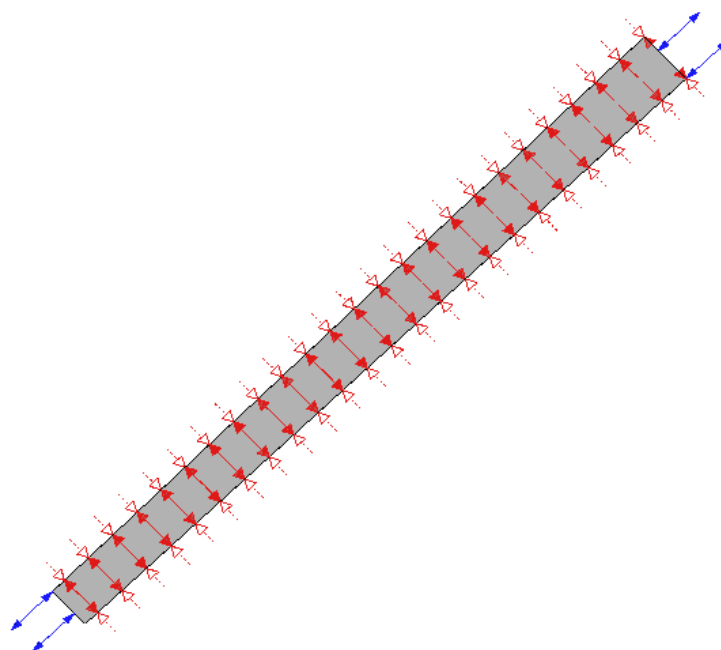


Рисунок 2.6 – Геометрія проточної частини і граничні умови (вхід, вихід і симетрія)

В наслідок використання сіткового генератору ANSYS Meshing було отримано структуровану гекса-сітку для геометрії проточної частини та твердотільної частині ущільнення (рис. 2.7, 2.8).

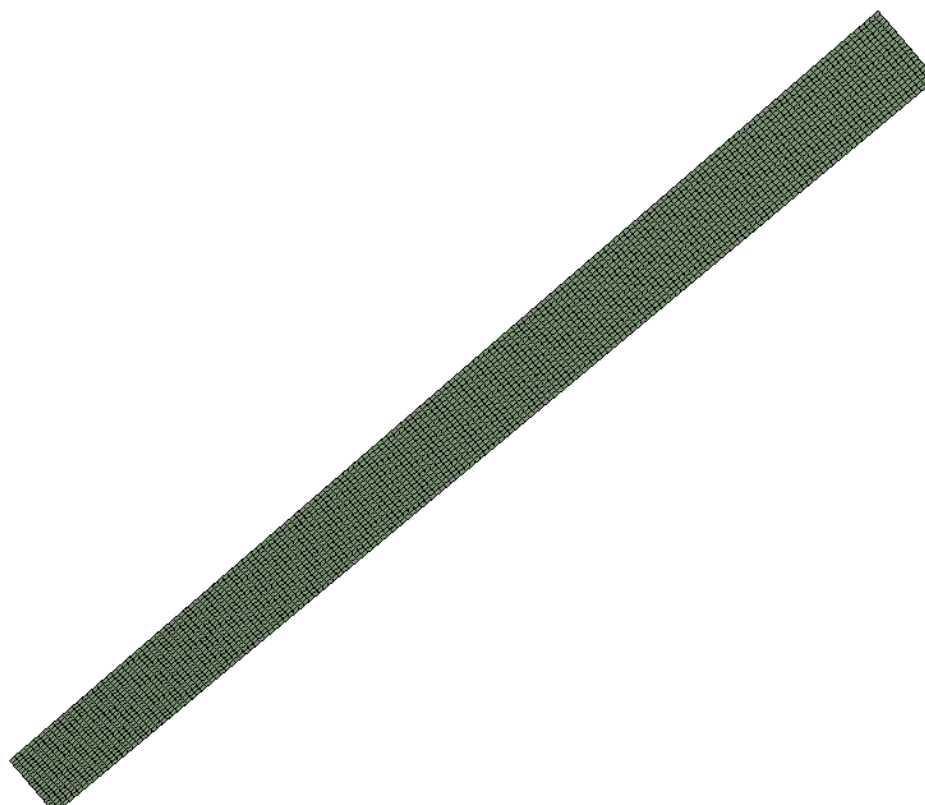


Рисунок 2.7 – Скінчено-елементна сітка проточної частини

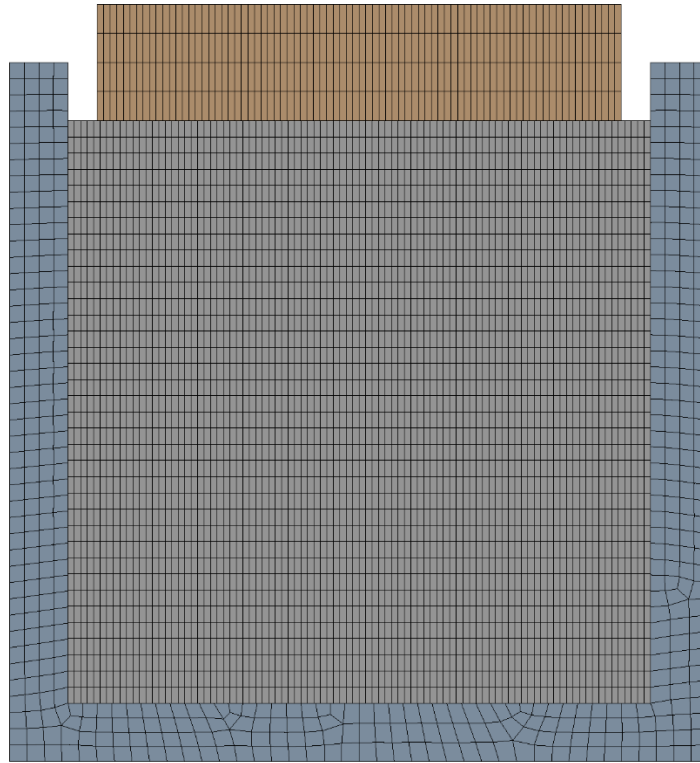
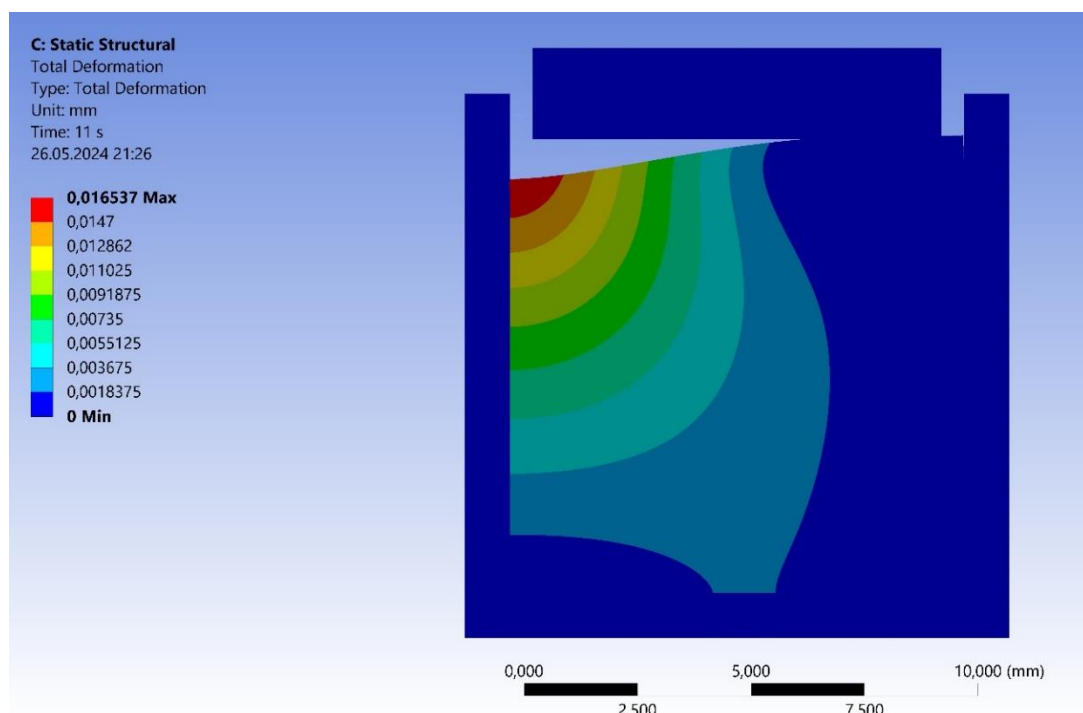


Рисунок 2.8 – Скінчено-елементна сітка твердотільної частині ущільнення

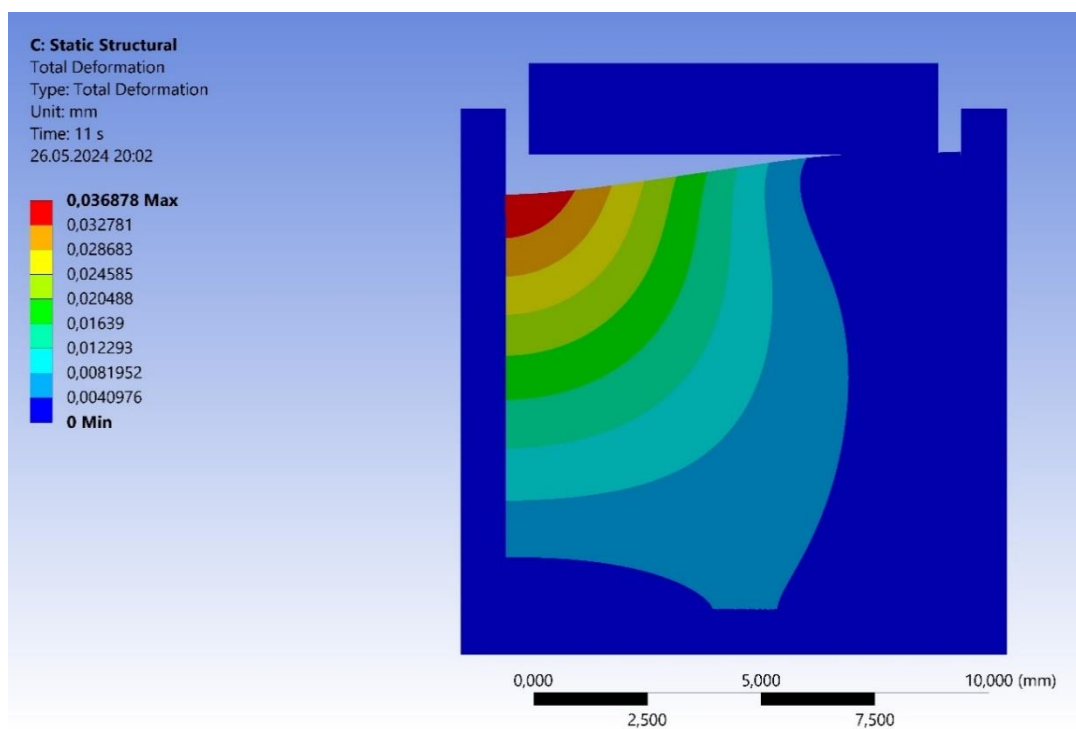
2.3 Результати розрахунку

На рисунках 2.9 – 2.11 наведені результати розрахунку задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення для різних тисків ущільнювальної рідини. В результаті розрахунку отримано розподіл гідростатичного тиску по довженні пари тертя, деформації кільця сальникової набивки та контактний тиск.

Як видно з рисунків, вся ширина пари тертя розділена на дві ділянки: ділянка зазору та ділянка контактна. Це пов'язано з тим, що сальникова набивка віджимається від торцевої поверхні аксіально рухомої втулки тиском ущільнювальної рідини p_1 . Чим більший тиск ущільнювальної рідини тим менша ділянка контакту, яка відіграє основну роль герметизатора, та більше ділянка зазору. Такий розподіл пари тертя на дві ділянки як зазначалося вище є основним недоліком торцевих сальникових ущільнень.

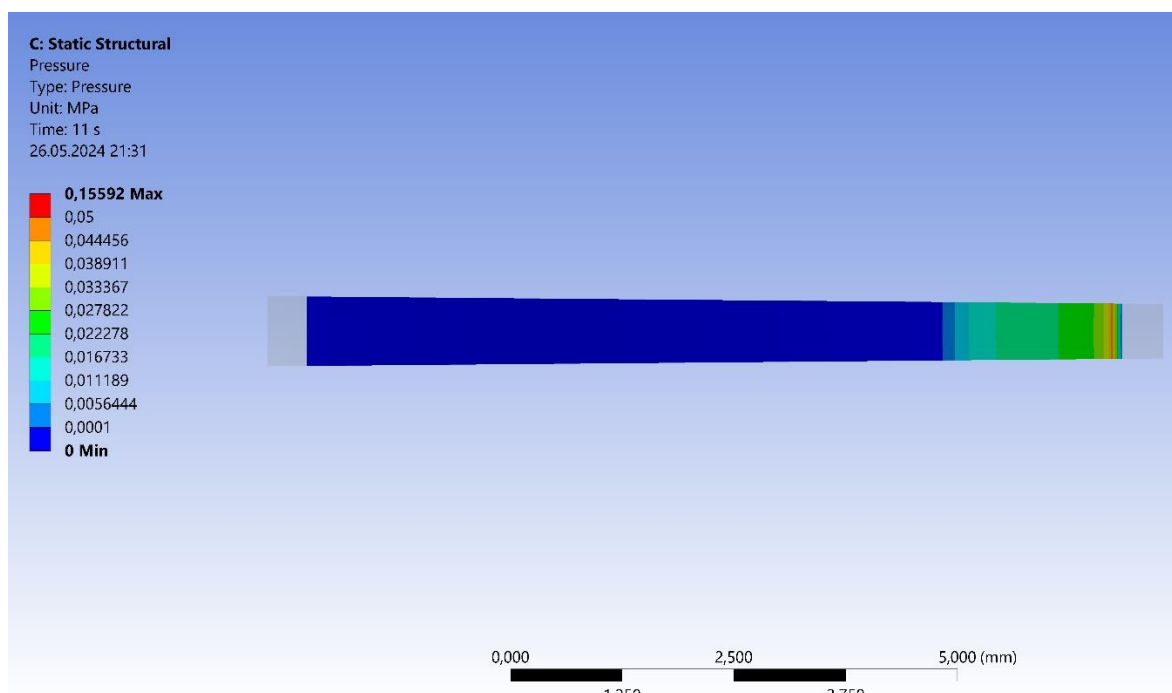


а)

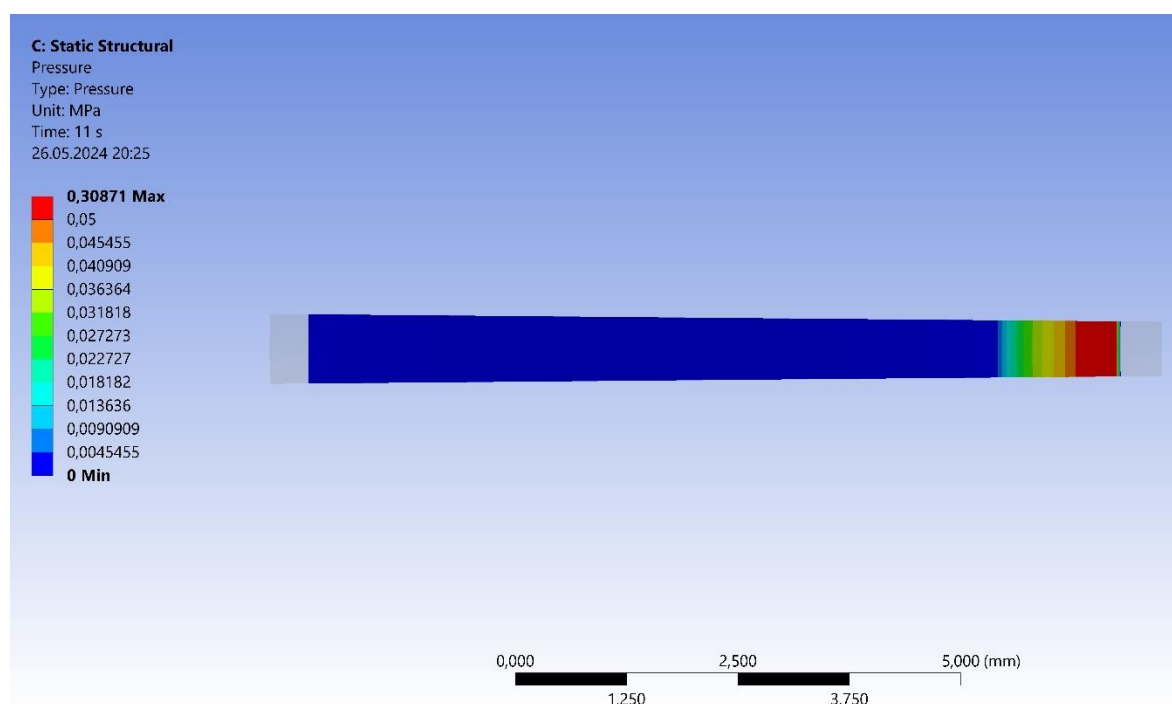


б)

Рисунок 2.9 – Деформація кільця сальникової набивки в залежності від ущільнювального тиску:
а) 0,2 МПа; б) 0,4 МПа



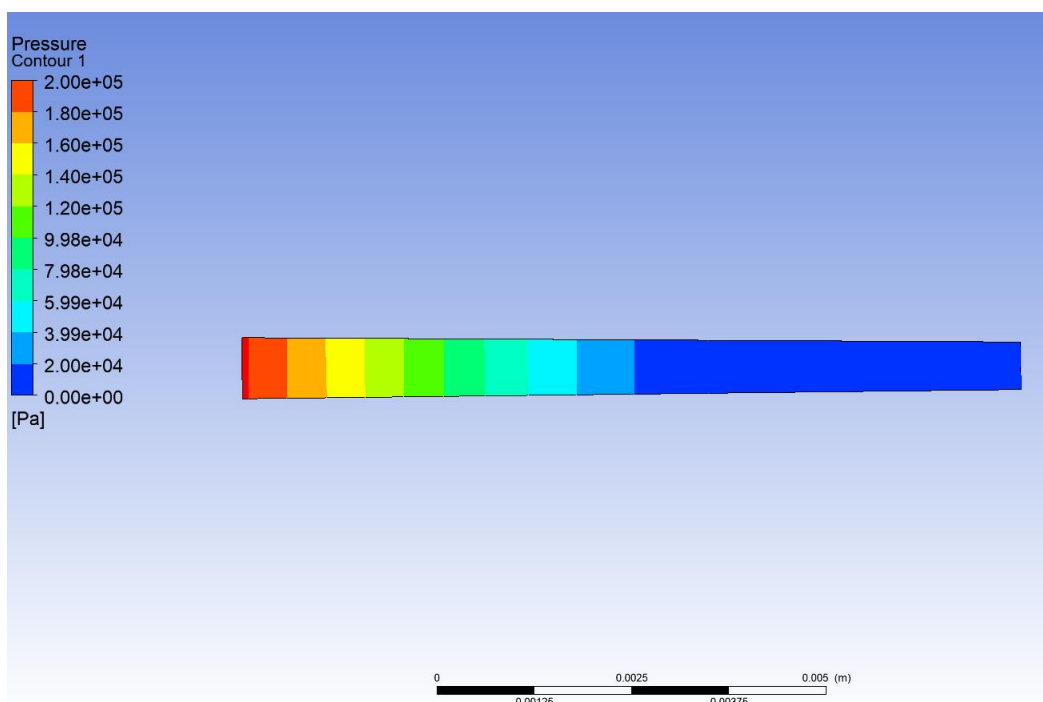
a)



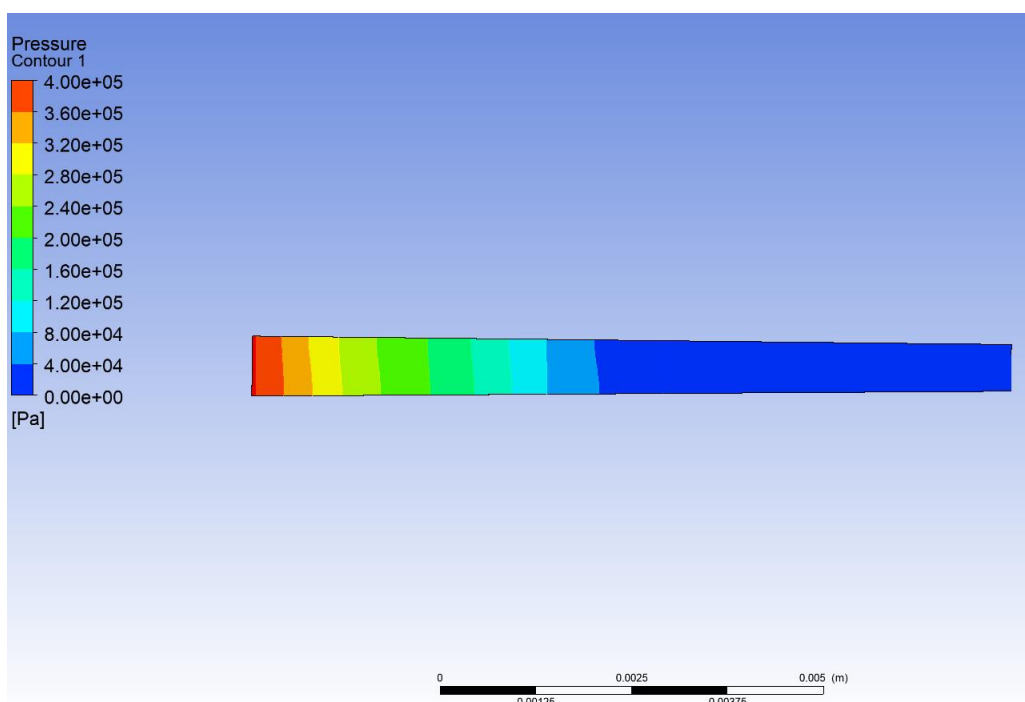
б)

Рисунок 2.10 – Розподіл контактної тиску по довженні пари тертя торцевого сальникового ущільнення в залежності від ущільнювального тиску:

а) 0,2 МПа; б) 0,4 МПа



а)



б)

Рисунок 2.11 – Розподіл гідростатичного тиску по довженні пари тертя торцевого сальникового ущільнення в залежності від ущільнювального тиску:

а) 0,2 МПа; б) 0,4 МПа

Для перевірки запропонованої методики числового розрахунку задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення в програмному комплексі ANSYS Student було проведено порівняльний аналіз отриманих результатів з експериментальними даними [18]. На рисунку 2.12 наведено порівняння розподілу гідростатичного тиску по радіусу пари тертя торцевого сальникового ущільнення. Порівняння розподілів гідростатичного тиску свідчить про достовірність розробленої методики числового розрахунку задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення.

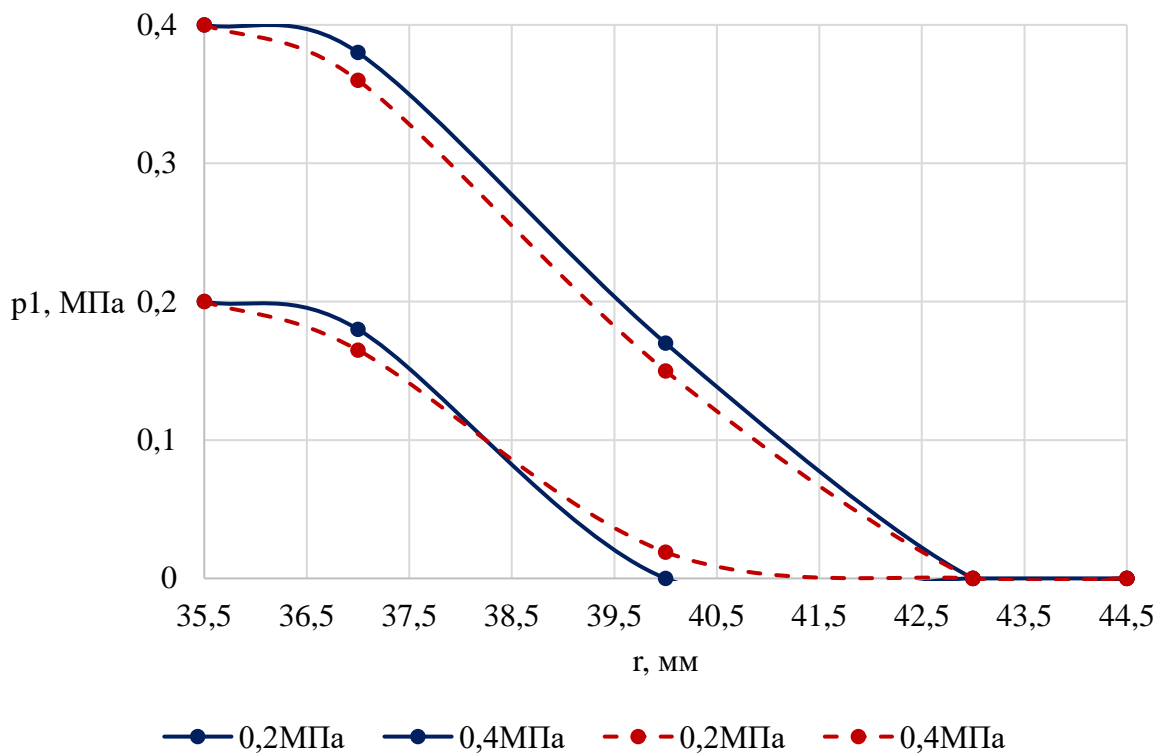


Рисунок 2.12 – Розподіл гідростатичного тиску по радіусу пари тертя торцевого сальникового ущільнення:

————— – результати числового розрахунку;
 - - - - - – результати експериментальних досліджень

2.4 Висновки

В даному розділі за допомогою програмного комплексу ANSYS Student проведений розрахунок задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення. В результаті розрахунку отримано розподіл гідростатичного тиску по довженні пари тертя, деформації кільця сальникової набивки та контактний тиск. Для перевірки запропонованої методики числового розрахунку задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення в програмному комплексі ANSYS Student було проведено порівняльний аналіз отриманих результатів з експериментальними даними. Порівняння розподілів гідростатичного тиску свідчить про достовірність розробленої методики числового розрахунку задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення. Розроблена методика може бути використана для розрахунку задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь-ПТФЕ композит».

3. ЧИСЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ЗАДАЧІ ГІДРОПРУЖНОСТІ ТОРЦЕВОГО МЕХАНІЧНОГО УЩІЛЬНЕННЯ З ПАРОЮ ТЕРТЯ «СТАЛЬ – ПТФЕ-КОМПОЗИТ»

3.1 Торцеві механічні ущільнення

Одним з основних вузлів насосного і компресорного устаткування є ущільнення валу, що обертається, так як від роботи ущільнення в цілому залежать ресурс і надійність машини.

У більшості сучасних відцентрових насосів в якості кінцевих ущільнень часто використовуються торцеві ущільнення (ТУ) [23] (рис. 3.1). Вперше такі ущільнення стали застосовуватися на початку ХХ-го століття, але широке застосування в насособудуванні та хімічній промисловості отримали в середині минулого століття.

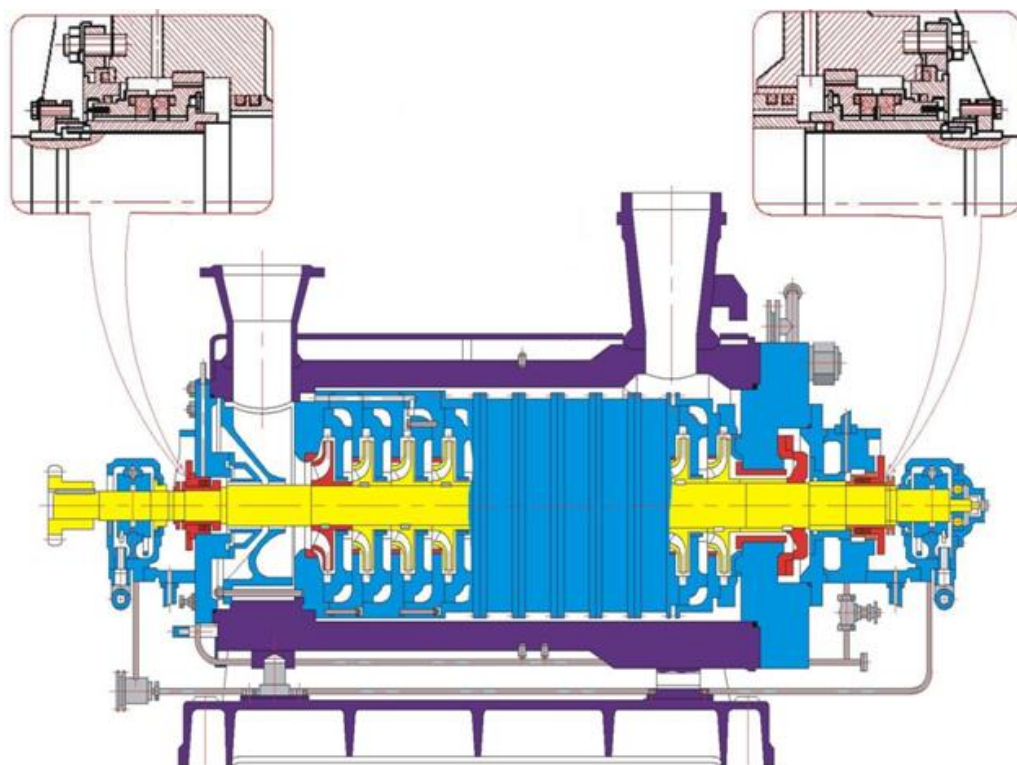


Рисунок 3.1 – Багатоступінчастий живильний насос ПЕ 580-185-5

На рисунку 3.2 показана конструкція ТУ. Ущільнення працює таким чином. Кільце 1 встановлено в корпусі машини 4, кільце 2 пов'язано з валом, що обертається 5. Торцева поверхня кільця 1 притискається до обертового кільця 2 пружним елементом 3. Герметичність забезпечується за рахунок щільного контакту торцевих поверхонь кілець ущільнення. Протікання в такій конструкції ТУ може відбуватися в двох напрямках: через торцевий зазор між кільцями ущільнення 1 і 2, а також через зазор між кільцем 2 і валом 5. Зі збільшенням контактного тиску герметичність ущільнення підвищується, проте при цьому збільшуються втрати потужності на тертя, в результаті чого збільшується знос поверхонь, які труться, їх нагрів і температурні деформації. Протіканням через зазор між кільцем 2 і 5 перешкоджає ущільнювальне гумове кільце.

Основними перевагами ТУ є висока герметичність і довговічність. Довговічність обумовлюється тим, що знос тертьових поверхонь кілець ущільнення компенсується переміщенням кільця 2 в осьовому напрямку за рахунок пружного елемента 3, а також правильним вибором матеріалів тертьових поверхонь ущільнення. До недоліків ТУ можна віднести раптовість відмови і неможливість спрогнозувати ресурс роботи ущільнення в цілому.

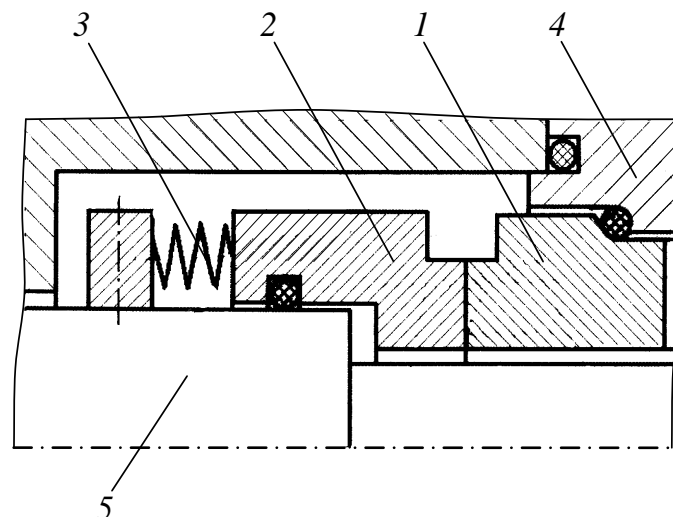


Рисунок 3.2 – Конструкція торцевого механічного ущільнення

3.2 Вихідні дані для числового розрахунку задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-композит»

Сучасна промисловість випускає десятки тисяч марок наповнених полімерних композитів. Властивості термопластичних композитних матеріалів визначаються властивостями полімерної матриці та наповнювачів, співвідношенням їх вмісту у композиції, характером розподілу наповнювача у матриці, природою взаємодії на межі розділу матриця-наповнювач. При цьому саме технологія отримання композиту дозволяє наблизити його реальну структуру до теоретичної, гарантуючи необхідні експлуатаційні властивості.

В науково-дослідній лабораторії прикладного матеріалознавства кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів Сумського державного університету на системній основі проводяться наукові дослідження, які пов'язані з дослідженням технологічних процесів створення ПТФЕ-композитів з наповнювачем із вторинної сировини. В роботах [19-22] описується технологія виробництва композитних матеріалів на основі ПТФЕ.

Спосіб отримання композитного матеріалу на основі ПТФЕ, який описується в роботі [20] полягає в змішування компонентів у сухому стані, формуванні заготовок в холодному стані під тиском, з наступним спіканням в прес-формі закритого типу та пресуванням. Пресування проводять з постійним тиском обумовленим дією температури спікання в прес-формі закритого типу з фіксуєчим елементом, поперечний переріз якого відповідає максимальним руйнуючим напружам матеріалу фіксуєчого елемента. При цьому попередньо сформована в холодному стані заготовка починає розширятися в прес-формі закритого типу під дією термічних напружень, що призводить до деформації частинок композитного матеріалу і заповнення пустот між частками. Матеріал піддається стискаючим напруженням, які в даному випадку будуть однакові як по висоті так і по об'єму заготовки. Це дуже суттєво, так як підвищений тиск викликає перенапруження на межах

часток наповнювача (вуглецевого волокна), що призводить до утворення маленьких волосяних тріщин в заготовці композиту. Крім цього, процеси спікання і самоущільнення композитного матеріалу проходять одночасно, що запобігає його розтріскуванню, яке спостерігається при вільному спіканні.

Для запобігання перепресування композитного матеріалу пресформа закритого типу споряджена фіксуєчим елементом. Його переріз відповідає максимальним руйнуючим напругам для даного матеріалу, які виникають всередині об'єму прес-форми закритого типу за рахунок розширення спікаємого композитного матеріалу і передаються на фіксуєчий елемент. При досягненні тиску пресування розрахункового значення, напруження в фіксуєчому елементі пресформи перевищують допустимі значення і цей фіксуєчий елемент, розриваючись, розгерметизовує пресформу. Щільність одержаного таким способом матеріалу постійна по всьому об'єму, що гарантує монолітність і стабільність його властивостей. Це також дозволяє досягти максимального армуючого ефекту в композиті і тим самим підвищити зносостійкість та міцність композиту.

Даний спосіб отримання композитних матеріалів на основі ПТФЕ покращує їх зносостійкість та міцність при розтягуванні. В порівнянні з аналогами міцність при розтягуванні підвищується на 43% а зносостійкість підвищується на 65%.

Спосіб отримання композитного матеріалу на основі ПТФЕ, який описується в роботі [22] спрямований на підвищення міцності при розтягуванні та зносостійкості композитного матеріалу на основі ПТФЕ армованого вуглецевими волокнами шляхом зміни операції спікання. В процесі спікання матеріалу заготовки на стадії сплавляння часток полімеру і вуглецево волокнистого наповнювача в композиті закладаються хімічні, фізико-механічні, фізико-хімічні і електричні властивості майбутнього виробу. Після каскадного режиму термічного впливу на композит при спіканні, що включає поєднання нагрівання з різними швидкостями і витримки різної тривалості з повільним охолодженням, проходить почергова

розорієнтація і стабілізація його структури на молекулярному рівні. При цьому відбувається орієнтація фрагментів макромолекул, що дозволяє сформувати більш однорідну надмолекулярну структуру і стабільні властивості композиту по всьому об'єму. В результаті цього підвищується зносостійкість та міцність композиту.

Даний спосіб отримання композитних матеріалів на основі ПТФЕ покращує їх зносостійкість та міцність при розтягуванні. В порівнянні з аналогами міцність при розтягуванні підвищується на 24% а зносостійкість підвищується на 35%.

Для числового розрахунку розрахунок задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-композит» використовувалися фізико-механічні властивості ПТФЕ-композита, які отримані способом наведеним в роботі [8]. Даній роботі проводились дослідження залежності структури наповнювача та властивостей ПТФЕ композиту від технології подрібнення фторполімерної сировини.

Основними факторами, що впливають на процес формування структури матеріалу і його властивостей при сухому змішуванні ПТФЕ і ВВ наповнювача, є:

- механіко-фізичні властивості і масове співвідношення вихідних компонентів суміші;
- тип і технічна характеристика змішувального об-ладнання (швидкість обертання робочих органів змішувача, форма робочих органів, ступінь завантаження змішувальної камери, потужність приводу);
- час змішування композиції;- технологія введення компонентів суміші в змішувальний апарат;
- вплив на компоненти композиції в процесі змішування температури, тиску або розрідження. Процес сухого змішування ПТФЕ і ВВ наповнювача здійснюється в результаті дії зовнішніх сил (напруг зсуву, що виникають внаслідок існування відносного руху полімер-частинка).

В результаті процесу змішування відбуваються структурні зміни компонентів композиції і суміші в цілому на макро- (частки компонентів суміші) і мікро- (молекулярна будова інгредієнтів) рівні.

Як показали дослідження оптимальним є наповнення 25 % вторинної сировини у складі ПТФЕ- композиту, при якому експлуатаційні властивості створюваного матеріалу є максимальними. В таблиці 3.1 наведені фізико-механічні властивості ПТФЕ-композита, які отримані способом наведеним в роботі [8].

Таблиця 3.1 – Фізико-механічні властивості ПТФЕ-композита

Склад	Густина, кг/м ³	Міцність при розтягуванні, МПа	Міцність при стисканні, МПа	Модуль пружності, МПа	Відносне подовження, %	Інтенсивність зношування, мм ³ /Н·м
ПТФЕ + 25 % ВС	2140	16,8	21,2	1250	150	11,91·10 ⁻⁶

Для розрахунку приймалися такі геометричний розміри ущільнення:

- r1 = 45 мм - зовнішній радіус набивання;
- r2 = 35мм - внутрішній радіус набивання;
- r3 = 44,5 мм - зовнішній радіус опорного кільця;
- r4 = 35,5 мм - внутрішній радіус опорного кільця.

Ущільнювальній тиск– 0,2; 0,4; МПа

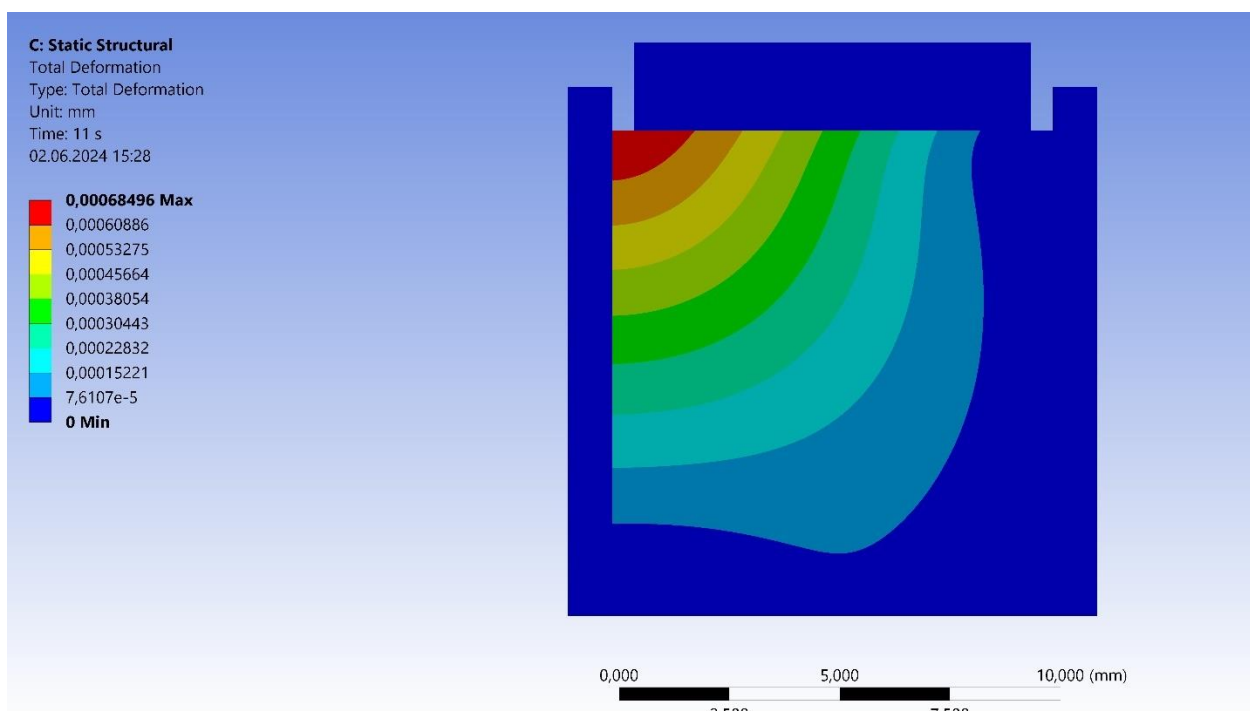
Розрахунок виконувався з урахуванням зусиль від натискної втулки.

Послідовність числового розрахунку розрахунок задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-композит» аналогічна послідовності наведеної в розділі 2.2

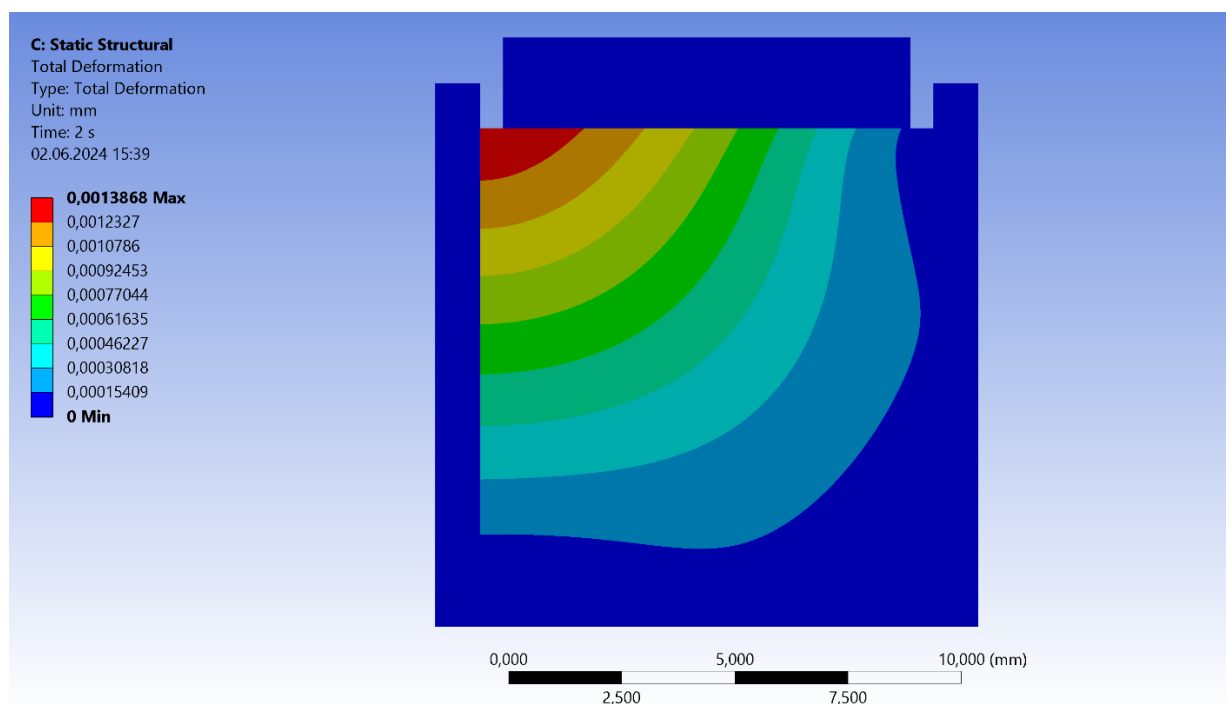
3.3 Результати розрахунку та порівняльний аналіз отриманих результатів

На рисунках 3.3, 3.4 наведені результати числового розрахунку задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-композит» для різних тисків ущільнювальної рідини. В результаті розрахунку отримано розподіл гідростатичного тиску по довженні пари тертя, деформації кільця з ПТФЕ-композиту.

Як видно з рисунків 3.4 гідростатичний тиск рівномірно розподіляється по ширині пари тертя. Деформації кільця з ПТФЕ-композиту знаходяться в межах величини шорсткості поверхонь. Таким чином можна зробити висновок, що ущільнення буде працювати в режимі змішаного змащення. Крім цього за рахунок використання ПТФЕ-композиту в якості одного із кілець ущільнення вирішення питання нерівномірного розподілу гідростатичного тиску по довженні пари тертя, яке притаманне торцевим сальниковим ущільненням. Проте для подальшого вивчення питання використання ПТФЕ-композиту в якості одного із кілець торцевого ущільнення необхідно провести експериментальні дослідження.



а)

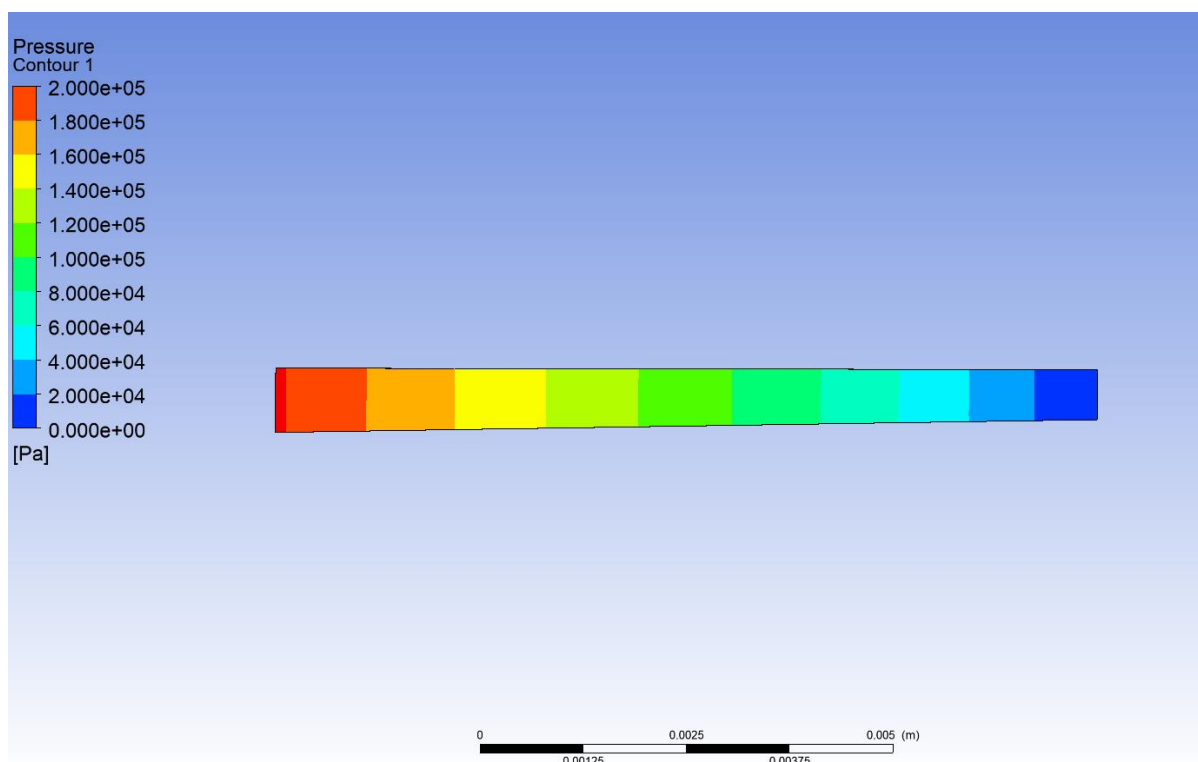


б)

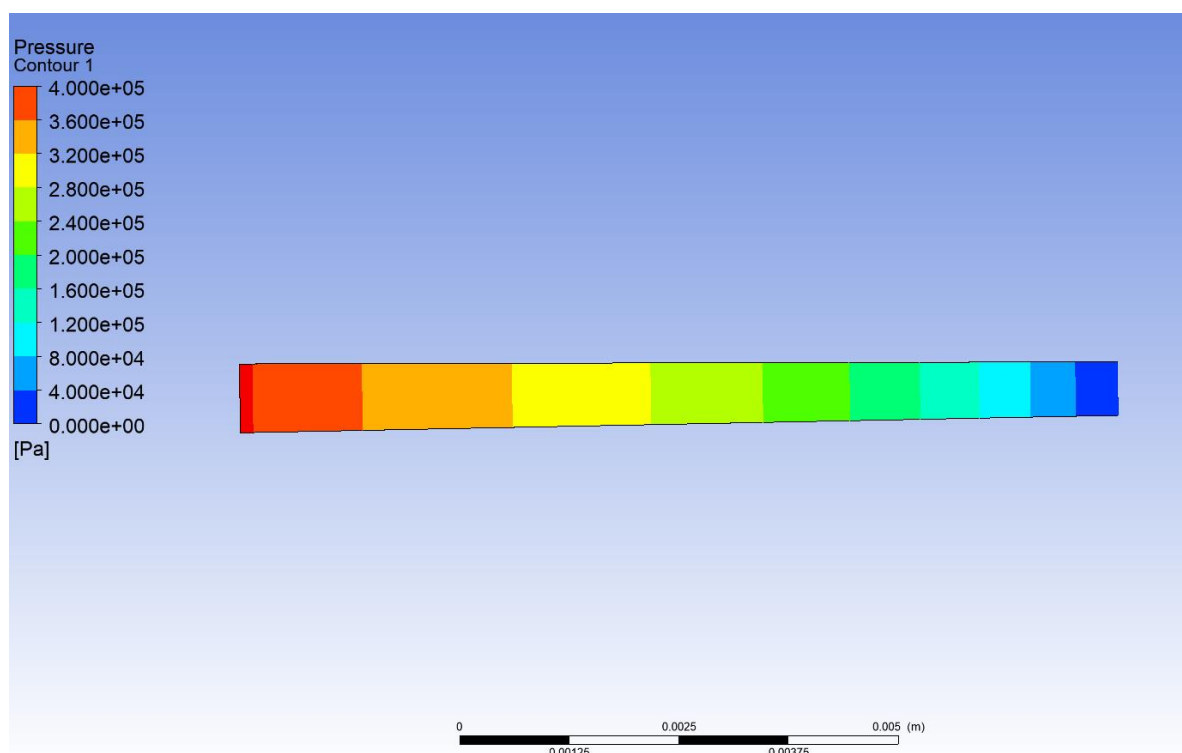
Рисунок 3.3 – Деформація кільця із ПТФЕ-композиту в залежності від

ущільнювального тиску:

а) 0,2 МПа; б) 0,4 МПа



а)



б)

Рисунок 3.4 – Розподіл гідростатичного тиску по довженні пари тертя торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-КОМПОЗИТ» в залежності від ущільнювального тиску: а) 0,2 МПа; б) 0,4 МПа

3.4 Висновки

В даному розділі за допомогою програмного комплексу ANSYS Student проведений розрахунок задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь – ПТФЕ-композит». В результаті розрахунку отримано розподіл гідростатичного тиску по довженні пари тертя, деформації кільця з ПТФЕ-композиту. Як видно з отриманих результатів гідростатичний тиск рівномірно розподіляється по ширині пари тертя. Деформації кільця з ПТФЕ-композиту знаходяться в межах величини шорсткості поверхонь. Таким чином можна зробити висновок, що ущільнення буде працювати в режимі змішаного змащення. Крім цього за рахунок використання ПТФЕ-композиту в якості одного із кілець ущільнення вирішення питання нерівномірного розподілу гідростатичного тиску по довженні пари тертя, яке притаманне торцевим сальниковим ущільненням. Проте для подальшого вивчення питання використання ПТФЕ-композиту в якості одного із кілець торцевого ущільнення необхідно провести експериментальні дослідження.

ВИСНОВКИ

ПТФЕ-композити мають низький коефіцієнт тертя, можуть використовуватися в широкому діапазоні температур, мають високу хімічну стійкість. Під час механічної обробки ПТФЕ-композитів виникає до 50% відходів у вигляді стружки від початкової маси, що може спричинити екологічні проблеми, які пов'язані з великою кількістю неутілізованих відходів. Одним із шляхів утилізації полімерних матеріалів є їх переробка, що дозволяє повернути у сферу споживання певну частину матеріалів без значних енергетичних і матеріальних втрат. Використання ПТФЕ-композитів з наповнювачем із вторинної фторполімерної сировини дозволяє зменшити витрати на початкову сировину. Одним із можливих варіантів використання ПТФЕ-композитів, є використання їх в якості матеріалів для кілець торцевих ущільнень, які використовуються для герметизації роторів відцентрових машин загальнопромислового призначення.

За допомогою програмного комплексу ANSYS Student проведений розрахунок задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення. В результаті розрахунку отримано розподіл гідростатичного тиску по довженні пари тертя, деформації кільця сальникової набивки та контактний тиск. Для перевірки запропонованої методики числового розрахунку задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення в програмному комплексі ANSYS Student було проведено порівняльний аналіз отриманих результатів з експериментальними даними. Порівняння розподілів гідростатичного тиску свідчить про достовірність розробленої методики числового розрахунку задачі гідропружності торцевого сальникового ущільнення. Розроблена методика може бути використана для розрахунку задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь-ПТФЕ композит».

За розробленою методикою числового розрахунку задачі гідропружності в програмного комплексу ANSYS Student проведений розрахунок задачі гідропружності торцевого механічного ущільнення з парою тертя «Сталь –

ПТФЕ-композит». В результаті розрахунку отримано розподіл гідростатичного тиску по довженні пари тертя, деформації кільця з ПТФЕ-композиту. Як видно з отриманих результатів гідростатичний тиск рівномірно розподіляється по ширині пари тертя. Деформації кільця з ПТФЕ-композиту знаходяться в межах величини шорсткості поверхонь. Таким чином можна зробити висновок, що ущільнення буде працювати в режимі змішаного змащення. Крім цього за рахунок використання ПТФЕ-композиту в якості одного із кілець ущільнення вирішення питання нерівномірного розподілу гідростатичного тиску по довженні пари тертя, яке притаманне торцевим сальниковим ущільненням. Проте для подальшого вивчення питання використання ПТФЕ-композиту в якості одного із кілець торцевого ущільнення необхідно провести експериментальні дослідження.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Шіхаб Таер Абдалвахаб Розроблення технології виготовлення кілець торцевих ущільнень відцентрових насосів із металокерамічних матеріалів на основі карбїду хрому. Науковий вісник ІФНТУНГ. Івано- Франківськ. 2016. № 1 (40). С. 41–49.
2. Лобас Д.І., Гудкова О.В., Гудков С.М. Експериментальні дослідження торцевих механічних ущільнень виконаних з ПТФЕ-композиту // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 20–23 квітня 2021 р.) – Суми : Сумський державний університет, 2021. – С. 115.
3. Handbook of fluoropolymer science and technology / edited by Dr. Dennis W. Smith, Dr. Scott T. Iacono, Dr. Suresh S. Iyer. – Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2014. – 646 p.
4. Polymer composites. Vol. 1 / edited by S. Thomas, J. Kuruvilla, S. K. Malhotra, K. Goda, M. S. Sreekala. – Weinheim : Wiley, 2012. – 829 p.
5. Venkateswarlu G. Polytetrafluoroethylene (PTFE) based composites / G. Venkateswarlu, R. Sharada, M. R. Bhagvanth // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. – 2014. – V. 6. – P. 508–517.
6. Наукові основи розробки полімерних композиційних матеріалів триботехнічного призначення на основі політетрафторетилену : монографія / Х. В. Берладір, О. А. Будник, К. О. Дядюра та ін. ; за заг. ред. К. О. Дядюри. – Суми : Сумський державний університет, 2017. – 176 с.
7. Створення модифікованих полімеркомпозиційних матеріалів з комплексом керованих властивостей для трибосистем ковзання [Текст]: звіт про НДР (заключний) / Кер. К.О. Дядюра. - Суми: СумДУ, 2016. - 98 с.
8. Lohmann R, Cousins IT, DeWitt JC, et al. Are Fluoropolymers Really of Low Concern for Human and Environmental Health and Separate from Other PFAS?. Environ Sci Technol. 2020;54(20):12820-12828.

9. Бухкало С.І. Екологічні та економічні проблеми утилізації полімерної тари та пакування продуктів харчування // III міжн. н/практ. конф «Хімія біо-и нанотехнології, екологія та економіка в харчовій і косметичній промисловості». 15-16 октября 2015. Х.: НТУ «ХПІ», С. 164–170.

10. European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals. The ECETOC Conceptual Framework for Polymer Risk Assessment (CF4Polymers), 2019.

11. Henry, B. J; Carlin, J. P; Hammerschmidt, J. A; Buck, R. C; Buxton, L W.; Fiedler, H.; Seed, J.; Hernandez, O. A Critical Review of the Application of Polymer of Low Concern and Regulatory Criteria to Fluoropolymers. *Integr. Environ. Assess. Manage.* 2018, 14(3), 316–334.

12. Фізико-хімічні аспекти механічної активації політетра-фторетиленової композиції при отриманні та рециклінгу / А. Ф. Будник, Х. В. Берладір, В. А. Свідерський, О. А. Будник, П. В. Руденко, А. А. Ільїних // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2014. – № 2/11 (68). – С. 9–15.

13. Підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей триботехнічних ПТФЕ-композитів методами механічної активації / О. А. Будник, Х. В. Берладір, А. Ф. Будник, П. В. Руденко // *Проблеми тертя та зношування.* – 2014. – № 4 (65). – С. 130–135.

14. Bruno Ameduri. The Promising Future of Fluoropolymers. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2020, 221 (8), pp.1900573.

15. Gaft, Y., Zahorulko, A., Martsynkovsky, V., Shevchenko, S. Face packing seals: New opportunities for pump rotor hermetic sealing (2000) *Proc. XVI Int. Conf. Fluid Sealing*, pp. 335-349.

16. Гудков С.М. Експериментальні дослідження гідродинамічно розвантажених торцевих сальникових ущільнень. *Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості:* / за ред. В.Б. Тарельника, Є.В. Коноплянченко. Суми: ФОП Литовченко Є.Б., 2020. С. 286-304.

17. <https://www.ansys.com/academic/students>

18. Гудков, С.М. Торцеве сальникове ущільнення з гідродинамічним розвантаженням пари тертя: дисертація... канд. технічних наук, спец.: 05.02.09 - динаміка та міцність машин/ С.М. Гудков. - Суми: СумДУ, 2015. - 154 с.

19. Пат. 40959 U Україна, МПК C08L27/00. Спосіб отримання полімерної композиції / Будник А. Ф., Руденко П. В., Будник О. А., Бурмістр М. В., Ільїних А. А., Юскаєв В. Б., Томас А. О. – № u200814770 ; заявл. 22.12.2008 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

20. Пат. 41868 U Україна, МПК C08L27/18. Спосіб отримання полімерного композитного матеріалу на основі політетрафторетилену / Будник А. Ф., Руденко П. В., Будник О. А., Бурмістр М. В., Ільїних А. А., Юскаєв В. Б., Томас А. О. – № u200900550 ; заявл. 26.01.2009 ; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11.

21. Пат. 40960 U Україна, МПК C08L27/00. Спосіб отримання вуглецевого наповнювача фторопластоматричного композита / Будник А. Ф., Будник О. А., Руденко П. В., Бурмістр М. В., Ільїних А. А., Юскаєв В. Б., Томас А. О. – № u200814771 ; заявл. 22.12.2008 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

22. Пат. 42870 U Україна, МПК C08L27/18. Спосіб одержання полімерного матеріалу на основі політетрафторетилену / Будник А. Ф., Ільїних А. А., Руденко П. В., Будник О. А., Бурмістр М. В., Юскаєв В. Б., Томас А. О. – № u200901562 ; заявл. 23.02.2009 ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14.

23. Гудков С. Н. Торцеві механічні ущільнення з гідродинамічним розвантаженням пари тертя / С. М. Гудков // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2007. – № 2. – С. 34-41.