

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

СКРІПЧЕНКО НАТАЛІЯ БОРИСІВНА



УДК 539.3

**КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ
МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ
ЛОКАЛЬНОЇ ПОДАТЛИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ткачук Микола Анатолійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри теорії і систем
автоматизованого проектування механізмів і
машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гриньов Володимир Борисович,
Харківський національний університет
будівництва та архітектури,
завідувач кафедри будівельної механіки

кандидат технічних наук, доцент
Іванов Євген Мартинович,
Харківський національний
автомобільно-дорожній університет,
доцент кафедри інженерної та комп'ютерної
графіки

Захист відбудеться « 16 » березня 2016 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.10 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « 10 » лютого 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.Г. Сукіасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У більшості машинобудівних конструкцій забезпечення їх функціонування вимагає передачі складних видів руху і значних робочих зусиль за допомогою контакту складнопрофільних деталей (зубчасті зачеплення, підшипники кочення, система «колесо-рейка» тощо). У силу цього між контактуючими тілами виникає значний контактний тиск, який у багатьох випадках визначає їхню конструкційну міцність.

Крім того, на жорсткість досліджуваного вузла впливає характер розподілу контактного тиску, обумовлений переміщенням точок взаємодіючих деталей як гладких або шорстких пружних тіл, точністю виготовлення контактуючих деталей та якістю їх обробки, наявністю хвилястості, шорсткості, прокладок, плівок, напилень тощо. Наявність і врахування цих чинників, у свою чергу, тягне за собою, наприклад, забезпечення або незабезпечення точності виконання технологічної або виробничої операції.

Відповідно, при проектуванні елементів машин виникає задача розробки методу визначення напружено-деформованого стану (НДС) складнопрофільних шорстких тіл з урахуванням контактної взаємодії, який би враховував наявність локальної податливості поверхневого шару спряжених поверхонь деталей. При цьому, властивість локальності для багатьох видів поверхневих шарів з точки зору реакції на контактний тиск таке саме, як для шару шорсткості, відмінність – тільки у величині податливості. У зв'язку з цим доцільно всі типи поверхневих шарів розглядати як шорсткість, а сама величина локальної податливості змінюється в широких межах, тим самим охоплюючи властивості різних шарів.

При розв'язанні задач контактної взаємодії доцільним є урахування розподілу первинного (початкового, без навантаження) зазору в спряженні складнопрофільних тіл, що описується многочленом вищого, ніж другий, ступеня (а, значить, і непридатність моделі Герца). Також при дослідженні контакту тіл складної форми виникає необхідність урахування нелокальності зони контакту, що спричинена сумірністю розміру контактної площадки з площею поверхні взаємодіючих тіл. Крім того, потрібно також прийняти до уваги сумірність переміщень, які викликані пружною деформацією взаємодіючих тіл (викликаних «глобальною» їх податливістю), з одного боку, і викликаних локальною податливістю пружного поверхневого шару, – з іншого. Таким чином, науково-практична задача дослідження контактної взаємодії складнопрофільних деталей машинобудівних конструкцій з урахуванням додаткових чинників є *актуальною* та визначила напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин у НТУ «ХПІ» згідно з планом фундаментальних і прикладних держбюджетних НДР МОН України: «Розробка теоретичних основ комп'ютерних кластерних технологій та унікального програмно-апаратного комплексу для дослідження складних та надскладних механічних систем» (ДР № 0107U006813), «Розвиток теоретичних основ синтезу геометрії та моделювання втомної міцності нових зубчастих зачеплень» (ДР № 0110U001233) та «Розробка спеціалізованих програмно-модельних комплексів для комп'ютерного моделювання контактної взаємодії та синтезу форми складнопро-

фільних тіл» (ДР № 0113U000420), і господарськими договорами: «Розробка математичної, геометричної і скінченно-елементної моделі для дослідження кінематики та НДС елементів макету механізму нахилу плавильної печі» (ВАТ «Головний спеціалізований конструкторсько-технологічний інститут» (ВАТ «ГСКТІ»), м. Маріуполь) та «Розробка методів математичного моделювання поведінки елементів об'єктів бронетанкової техніки під дією розподіленого навантаження для забезпечення їхньої захищеності» (ДП «ХКБМ ім. О.О. Морозова», м. Харків), а також згідно з договорами про науково-технічне співробітництво з ДП «Завод ім. Малишева», ВАТ «ГСКТІ», ДП «Харківський бронетанковий ремонтний завод» (ДП «ХБРЗ») та Карлівським машинобудівним заводом (КМЗ). У даних роботах здобувач була виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* полягає у розробці та реалізації методів забезпечення конструкційної міцності шляхом розв'язання задач аналізу напружено-деформованого стану складнопрофільних шорстких тіл з урахуванням їхньої контактної взаємодії.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні *задачі*:

- провести аналіз існуючих методів та моделей для аналізу контактної взаємодії пружних тіл;
- розробити комплексні фізичні та математичні моделі, методи для опису напружено-деформованого стану контактуючих шорстких тіл;
- розробити спеціалізований програмно-модельний комплекс для дослідження контактної взаємодії деталей складної форми на основі запропонованих моделей напружено-деформованого стану складнопрофільних шорстких тіл;
- провести аналіз НДС складнопрофільних шорстких тіл і встановити характерні особливості та закономірності зміни розподілу контактного тиску, а також величини і форми контактних площадок при варіюванні форми контактуючих їх поверхонь та локальної податливості поверхневого шару;
- провести експериментальне дослідження контактної взаємодії за наявності податливого проміжного шару і впровадити результати дисертаційних досліджень у виробництво.

Об'єкт дослідження: напружено-деформований стан складнопрофільних гладких і шорстких тіл у процесі контактної взаємодії.

Предмет дослідження: методи розв'язання задач контактної взаємодії гладких і шорстких складнопрофільних тіл, а також визначення закономірностей зміни напружено-деформованого стану, розподілу контактних зон і контактного тиску з урахуванням скінченності розмірів контактуючих тіл.

Методи дослідження. У роботі використовуються методи скінченних і граничних елементів для моделювання контактної взаємодії гладких і шорстких тіл; методи твердотільного тривимірного моделювання – для створення параметричних моделей досліджуваних тіл. Для визначення зон контакту і контактного тиску застосовувалися методи варіаційних нерівностей, метод граничних інтегральних рівнянь, прямі методи колокації і активних обмежень. Експериментальне дослідження контактної взаємодії здійснювалося

методом контактних відбитків на основі технології чутливих до тиску плівок.

Комплекс числових досліджень проводився в середовищі програми ANSYS (ліцензія НТУ «ХП» від фірми EMT U, м. Київ, 2011 р.) та із застосуванням Pro/ENGINEER (ліцензія НТУ «ХП» від фірми PTC, м. Москва, 2009 р.) і SolidWorks (ліцензійний сертифікат на використання програмного забезпечення № SEN0213 18/02-2006, серійний номер ліцензії 9710 0044 1189 7468). Для реалізації методу граничних елементів використане програмне середовище «ВЕМ», яке розроблене для розв'язання задач контактної взаємодії складнопрофільних тіл.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- проведено розв'язання нових задач аналізу НДС складнопрофільних тіл з урахуванням контактної взаємодії, що відрізняються від традиційних тим, що в математичній моделі процесу враховані різні закони розподілу первинних зазорів і наявність шорсткого або іншого податливого шару, причому в довільному поєднанні цих чинників;

- отримав подальший розвиток метод граничних інтегральних рівнянь, що полягає в новому підході до аналітичного обчислення коефіцієнтів матриці впливу з урахуванням податливості шорсткого шару і довільного розподілу зазору між контактуючими поверхнями;

- обґрунтовано підхід і продемонстрована можливість створення спеціалізованої бази даних, що дає змогу оперативно оцінювати контактний тиск у спряженні деталей машинобудівних конструкцій з урахуванням варіюваних силових і геометричних чинників;

- вперше установлені особливості форми і на конкретних прикладах продемонстровані якісні зміни контактних зон і розподілу контактного тиску в спряженні складнопрофільних тіл з урахуванням проміжного шару між їхніми контактуючими поверхнями;

- установлені закономірності зміни розподілу контактного тиску і величин контактних зон при варіюванні закону розподілу первинного зазору і податливості пружного шару між контактуючими тілами, а також розмірів тіл.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудівної галузі полягає в тому, що:

- теоретичні аспекти дисертації реалізовані в прикладних програмах розв'язання практично важливих задач розрахунку НДС при проектуванні елементів конструкцій, що містять шорсткі складнопрофільні тіла і деталі з плівками, прокладками, ущільненнями;

- отримані рекомендації з проектування дослідних зразків гідрооб'ємних передач, штампів, роликотітників, зубчастих передач, які призвели до створення працездатних конструкцій з високими технічними характеристиками, що підтверджує ефективність запропонованого в роботі підходу і його практичну застосовність;

- створений спеціалізований програмно-модельний комплекс може бути застосований для розв'язання задач обґрунтування проектних параметрів широкого класу контактуючих шорстких складнопрофільних тіл.

Результати досліджень впроваджені у практику проектно-дослідницьких робіт у

ПАТ «Азовмаш», КМЗ та науково-дослідної частини НТУ «ХП», від яких отримані акти впровадження.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення і основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно та знайшли відображення в опублікованих роботах. Проведені наступні дослідження: постановка, обробка й аналіз результатів числових та натурних експериментів для визначення залежності зміни величини максимального контактного тиску та розмірів плям контакту при варіюванні форми початкового зазору та податливості пружного проміжного шару; розробка нових підходів, фізичних і математичних моделей для урахування додаткових чинників, що впливають на характер розподілу контактного тиску; створення спеціалізованого програмно-модельного комплексу для розв'язання задач аналізу контактної взаємодії складнопрофільних шорстких тіл; розробка рекомендацій з проектування деталей машинобудівних конструкцій складної форми.

Апробація результатів дисертації. Основні результати та положення роботи доповідались на міжнародних науково-практичних конференціях (МНТК): XIX-XXIII-й МНТК «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD, м. Харків, 2011-2015 рр.); X-XII Міжнародних симпозіумах українських інженерів-механіків (м. Львів, 2011, 2013, 2015 рр.); 43^й, 44^й МНТК «Проблеми якості та довговічності зубчастих передач, редукторів, їх деталей і вузлів» (м. Севастополь, 2011-2013 р.); МНТК «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ» (м. Львів, 2014 р.); 45^й, 46^й МНТК «Проблеми якості та довговічності зубчастих передач, редукторів, їх деталей і вузлів» (м. Одеса, 2014, 2015 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 32 наукових працях, з них: 16 статей у наукових фахових виданнях України, 7 – у закордонних періодичних фахових виданнях, 9 – у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 178 сторінок; у т.ч. 96 рисунків по тексту; 8 рисунків на 5 окремих сторінках; 3 таблиці по тексту; список використаних джерел зі 168 найменувань на 19 сторінках, 4 додатки на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладені актуальність теми дисертації, її теоретична і практична цінність, сформульовані мета та основні завдання досліджень.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих видів локалізації контакту, форми і обробки робочих поверхонь контактуючих складнопрофільних тіл. Проведено узагальнення аналітичних та числових методів, що широко застосовуються для розв'язання задач аналізу НДС довільної форми з урахуванням контактної взаємодії. У розвиток цих методів значний вклад внесли такі учені, як В.М. Александров, Л.А. Галін, Г. Герц, П.П. Гонтаровський, К. Джонсон, А. Кравчук, Г.І. Львов,

В.М. Мухелішвілі, Г.Я. Попов, В.Л. Рвачов, І.Я. Штаєрман, J.J. Kalker, A.C. Signorini, J.C. Simo та ін. Систематизовано існуючі моделі для врахування локальної податливості шорсткості поверхонь контактуючих тіл.

Установлено, що подальшим напрямком механіки контактної взаємодії є узагальнення моделей спільного впливу глобальної та локальної податливостей, а також скінченності розмірів деталей на характер розподілу контактного тиску. Таким чином, виявлено низку теоретичних та практичних аспектів, які необхідно враховувати при розв'язанні задач аналізу контактної взаємодії, що враховують особливості складнопрофільних тіл.

У **другому розділі** описані теоретичні основи аналізу НДС складнопрофільних шорстких тіл з різним характером локалізації початкового контакту, а також поставлена та розв'язана задача про вплив скінченних розмірів на розподіл контактного тиску та контактних площадок у спряженні деталей машинобудівних конструкцій.

Для розв'язання даної задачі в роботі за основу прийнятий варіант методу граничних інтегральних рівнянь (МГІР), запропонований в роботах М.М. Ткачука. Здійснена модифікація МГІР для аналізу НДС з урахуванням контактної взаємодії складнопрофільних гладких і шорстких тіл, які обмежені поверхнями довільної форми, здійснюється в такій послідовності: спочатку формуються рівняння для випадку контакту гладких тіл, а потім вони узагальнюються на випадок шорстких тіл. При цьому для дискретизації граничних інтегральних рівнянь розроблено варіант методу граничних елементів (МГЕ), який враховує шорсткість поверхонь та довільний розподіл початкового зазору між контактуючими тілами.

При дослідженні контакту гладких складнопрофільних тіл аналізуються переміщення точок поверхонь і зазор між ними в нормальному напрямку (рис. 1). На цій основі виводяться кінематичні співвідношення контакту (рис. 2):

$$\begin{cases} u_{z_1}(x, y) + u_{z_2}(x, y) + h(x, y) = \delta_1 + \delta_2, & S_1 \text{ і } S_2 - \text{в контакті;} \\ u_{z_1}(x, y) + u_{z_2}(x, y) + h(x, y) > \delta_1 + \delta_2, & S_1 \text{ і } S_2 - \text{поза контактом.} \end{cases} \quad (1)$$

На відміну від традиційних методів знаходження контактного тиску та розмірів контактної площадки за аналітичною моделлю Герца, у якій зазор між контактуючими поверхнями має форму параболоїда, у роботі запропоновано використовувати довільний закон розподілу зазору. Зокрема, це важливо для випадків контакту тіл, поверхні яких апроксимуються, наприклад, многочленом не другого, а більш високих ступенів.

Застосовуючи модель пружного напівпростору (рис. 3), переміщення через функцію розподілу тиску $p(\xi, \eta)$ визначаються залежністю

$$\begin{aligned} u_{z_1}(x, y) + u_{z_2}(x, y) &= \left((1 - \nu_1^2) / \pi E_1 + (1 - \nu_2^2) / \pi E_2 \right) \times \\ &\times \iint_S [p(\xi, \eta) / \rho] d\xi d\eta = (\pi E^*)^{-1} \left\{ \iint_S [p(\xi, \eta) / \rho] d\xi d\eta \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

де ν_i , E_i , $i = 1, 2$ – пружні параметри кожного з контактуючих тіл (коефіцієнт Пуасона та модуль пружності), E^* – приведений модуль пружності двох тіл.

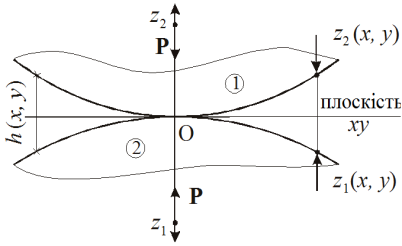


Рисунок 1 – Подання локального зазору між контактуючими тілами

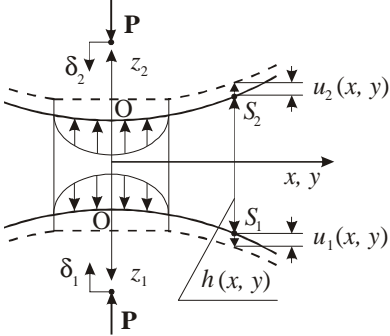


Рисунок 2 – Деформація тіл у контакті

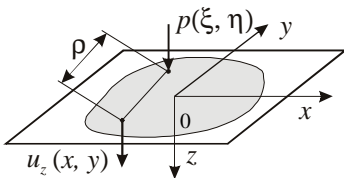


Рисунок 3 – Переміщення границі напівпростору під дією нормального зусилля

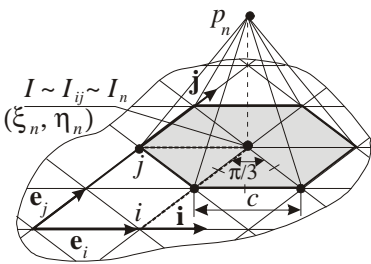


Рисунок 4 – Регулярна трикутна сітка та пірамідальний елемент функції тиску

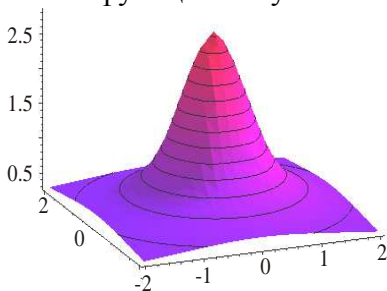


Рисунок 5 – Розподіл переміщень точок поверхні напівпростору від дією тиску (див. рис. 4)

Шукана функція контактного тиску $p(\xi, \eta)$ наближається суперпозицією масиву пірамідальних елементарних розподілів, вершини яких розташовані у вузлах регулярної сітки з кроком c , що складається з рівносторонніх трикутників (рис. 4, 5), і при цьому повністю визначається дискретним набором вузлових значень тиску p_n ($n = 1, \dots, N$):

$$p(\xi, \eta) \cong \sum_{m=1}^N \hat{p}(\xi - \xi_n, \eta - \eta_n) \cdot p_n; \quad \frac{\sqrt{3}}{2} c^2 \sum_{n=1}^N p_n = P.$$

Використання загальної сітки для пірамідальних елементів тиску і вузлів колокацій дає можливість записати співвідношення МГР (1) у дискретній формі МГЕ:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^N C_{nm} p_m + h_n - \delta = 0, \text{ вузол } J_n - \text{ в контакті;} \\ \sum_{m=1}^N C_{nm} p_m + h_n - \delta > 0, \text{ вузол } J_n - \text{ поза контактом.} \end{cases} \quad (3)$$

Тут заданими є масив зазорів h і зусилля притиснення P , а шуканими – контактний тиск p_m і зближення δ .

Крім того, для розв’язання задачі необхідно задовольнити системі співвідношень (відповідно, умови непроникнення тіл та додатності контактного тиску):

$$\{u - \delta \leq 0, p \geq 0\} \Rightarrow (u - \delta) \cdot p = 0. \quad (4)$$

Розв’язок одержаної визначальної системи рівнянь (3) та нерівностей (4) знаходиться у ході ітераційної процедури. Отже, отримуємо у результаті і зону контакту, і дійсний розподіл контактного тиску.

Особливістю запропонованого в роботі методу розв’язання контактних задач є урахування в загальній моделі контактної взаємодії складнопрофільних тіл впливу податливості шорсткого шару. Для цього застосовна у першому наближенні модель пружного шару, жорсткісні властивості якого еквівалентні властивостям шорсткого поверхневого шару. Досліджуване тіло розглядається як сукупність двох частин: Ω' – гладке пружне тіло і Ω^\wedge – шорсткий шар, що його покриває (рис. 6). При цьому для переміщень u_z^Σ точок поверхні S^\wedge існує залежність

$$u_z^\Sigma = u'_z + u_z^\wedge, \quad (5)$$

де u'_z – переміщення гладкого тіла, які знаходяться з інтегрального співвідношення (2); u^{\wedge}_z – переміщення шорсткого шару. Для моделювання шорсткого шару застосована модель Вінклера

$$u^{\wedge}_z = \lambda p, \quad (6)$$

де λ – податливість шару (або сумарно декількох шарів), що залежить від властивостей матеріалу і якості обробки поверхні досліджуваного тіла. Таким чином, система співвідношень для розв'язання контактних задач з урахуванням шорсткого шару має вигляд:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^N C_{nm} p_m + h_n - \delta &= 0, \text{ вузол } J_n \text{ – в контакті;} \\ \sum_{m=1}^N C_{nm} p_m + h_n - \delta &> 0, \text{ вузол } J_n \text{ – поза контактом,} \end{aligned} \quad (7)$$

де коефіцієнти матриці впливу $C_{nm}^{\Sigma} = C_{nm} + \lambda \delta_{nm}$.

Отримані співвідношення за структурою аналогічні розв'язувальній системі для гладких тіл, за винятком внесення в матрицю коефіцієнтів впливу додаткових доданків, розташованих на головній її діагоналі. Потрібно відзначити, що представлені співвідношення демонструють, що матриця коефіцієнтів впливу, яка є сумою двох окремих матриць, не може бути в загальному випадку обернена та представлена у вигляді суми двох окремих розв'язків, одержуваних за спрощеними залежностями. Тому, незважаючи на відносну простоту вихідних рівнянь та нерівностей, обернена система співвідношень задовольняється тільки шляхом їх спільного розв'язання, з урахуванням і глобальних, і локальних властивостей податливостей.

Для розв'язання задачі про вплив скінченних розмірів деталей машинобудівних конструкцій на розподіл контактного тиску у роботі проведено аналіз контактної взаємодії з урахуванням скінченних розмірів сполучених тіл. Варійованими параметрами є характерні геометричні розміри спряжених тіл параметри α, β, γ , а також величина притискного зусилля – параметр f (рис. 7):

$$\alpha = R_2 / R_1, \quad \beta = b / R, \quad \gamma = c / R_1, \quad f = F / F_0. \quad (8)$$

Для оцінки впливу варійованих чинників введено параметри $q = p_{\max} / p_{\max}^H$ (p_{\max} – розрахункове значення максимального контактного тиску, p_{\max}^H – відповідний розв'язок для поточної моделі методом Герца), а для оцінки розміру контактних плям – $\psi = a' / a$ (a' – довжина напівосі контактної плями).

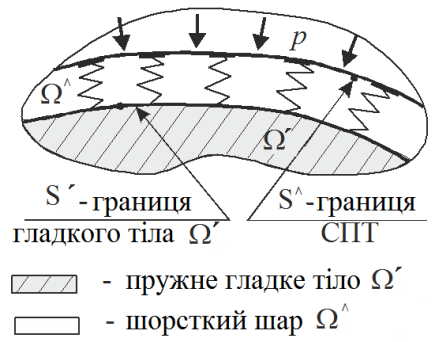


Рисунок 6 – Модель шорсткого складнопрофільного пружного тіла

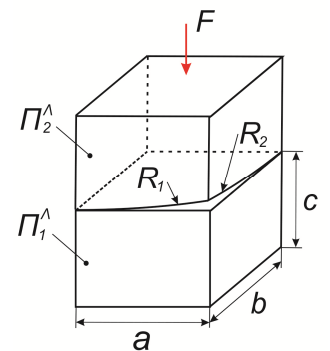


Рисунок 7 – Контакт обмежених областей Π_1^{\wedge} та Π_2^{\wedge}

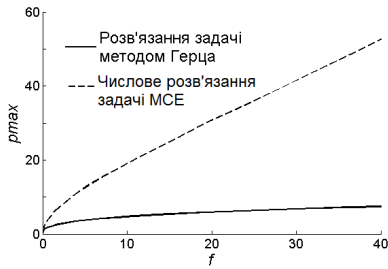


Рисунок 8 – Залежність p_{max} при варіюванні параметра f

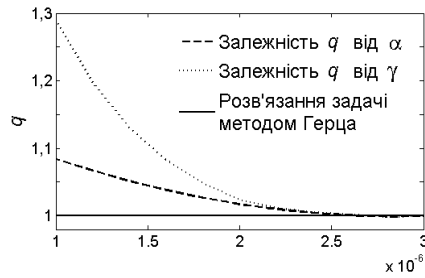


Рисунок 9 – Залежність q при варіюванні площі поверхонь контактуючих тіл та при зміні розміру в плані

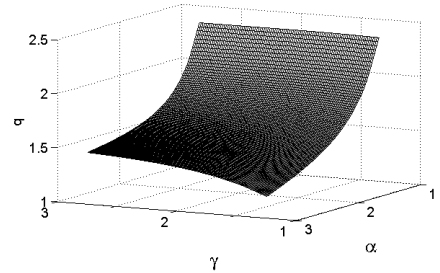


Рисунок 10 – Залежність q при одночасному варіюванні параметрів α , γ

Отримані залежності, які представлені на рис. 8-10, відображають високий ступінь впливу варійованих чинників (та їх поєднання) на характер розподілу контактної тиску і величину контактних площадок. При цьому проведені дослідження дають змогу створити загальну базу даних, що містить у собі залежності зміни контактних площ та максимального контактної тиску не тільки від одного з параметрів, але і від їх комбінації.

Таким чином, описані у другому розділі методи складають теоретичну основу для розв'язання задач дослідження НДС складнопрофільних шорстких тіл з урахуванням контактної взаємодії.

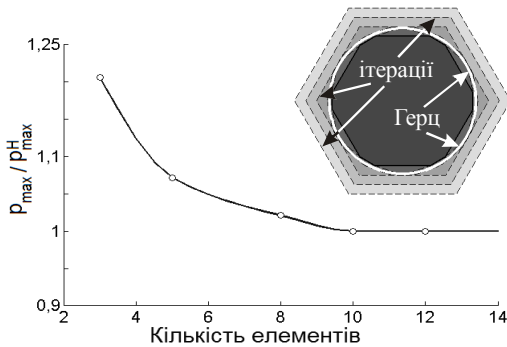


Рисунок 11 – Залежність визначення максимального контактної тиску від кількості елементів N

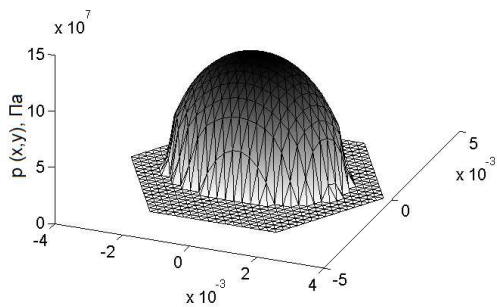


Рисунок 12 – Розподіл контактної тиску, отриманий у розробленому СПМК

Похибка розв'язку при визначенні максимального контактної тиску із зменшенням розміру елементів s складає менше одного відсотка вже при $N = 10$ на піввісь контактної плями. Таким чином, показана висока точність розв'язання контактних задач за допомогою створеного програмно-модельного комплексу.

Крім того, отримані залежності, які відображають високий ступінь впливу

Розділ 3 присвячений числовій реалізації методу граничних елементів та створенню спеціалізованого програмно-модельного комплексу (СПМК) для дослідження контактної взаємодії складнопрофільних тіл. Створений СПМК містить блок введення вихідних даних, якими виступають зусилля притиснення P , характеристики матеріалу контактуючих тіл E і ν , кількість граничних елементів N та їх розмір s , а також повинні бути задані масив зазорів h і значення податливості проміжного шару λ . Шуканими величинами є контактний тиск p_m і зближення δ .

Для підтвердження працездатності розробленого СПМК розв'язано низку тестових задач. Проведено аналіз задачі про взаємодію параболоїду з різними радіусами кривизни з напівпростором. На рис. 11, 12 наведено ілюстрації стягування зони контакту до аналітичного розв'язку методом Герца в ході ітераційного його уточнення та розподіл контактної тиску,

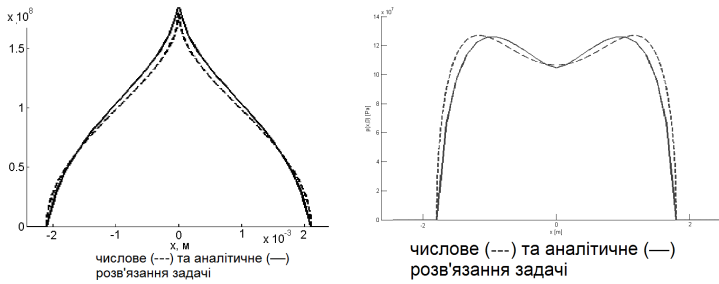


Рисунок 13 – Розподіл контактної тиску для різного ступеня розподілу первинного зазору K

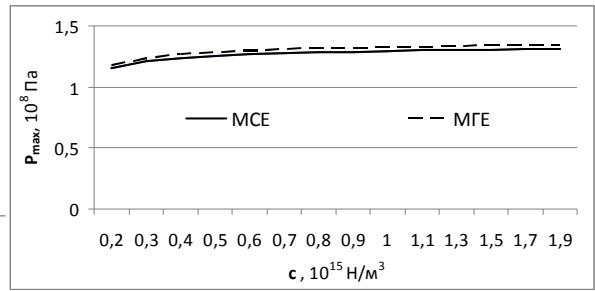


Рисунок 14 – Залежність максимального контактної тиску від значення податливості проміжного шару

закону розподілу початкового зазору (зокрема, показників ступеня $K = 1.5$ та $K = 4$, для яких І.Я. Штаерманом отримано аналітичне розв'язання задачі), на розподіл контактної тиску. Мова йде про закон розподілу зазору у вигляді

$$h = U \cdot (r/a)^K, \quad (9)$$

де U – величина підйому поверхні h ; a – характерний заданий розмір; K – ступень розподілу початкового зазору.

На рис. 13 представлені розподіли контактної тиску на осі Ox , які отримано за відомим аналітичним розв'язком та МГЕ. Похибка при визначенні максимального контактної тиску відносно аналітичного розв'язку склала близько 5%. Потрібно відзначити, що при розв'язанні цих тестових задачі основною метою є одержання якісної відповідності між розподілами контактної тиску. Крім того, проведено порівняння розв'язків контактної задачі з урахуванням контактної податливості методом граничних елементів та МСЕ, похибка становить не більше 3 %, при цьому МГЕ дає можливість значно скоротити час розв'язання задачі порівняно з МСЕ (рис. 14). Таким чином, отримані результати підтвердили застосовність розробленого спеціалізованого програмно-модельного комплексу, а також його точність і оперативність.

Розділ 4 містить розв'язання прикладних задач аналізу контактної взаємодії складнопрофільних деталей з урахуванням локальної податливості поверхневого шару. Вибір об'єктів досліджень при цьому зумовлений реальними потребами заводів, НДІ та КБ, що проектують і виробляють машини із складнопрофільними деталями.

Розв'язана задача дослідження впливу форми зазору і податливості шорсткого шару на характер розподілу контактної тиску. На рис. 15 представлені отримані залежності величини максимального контактної тиску при варіюванні ступеню функції первинного

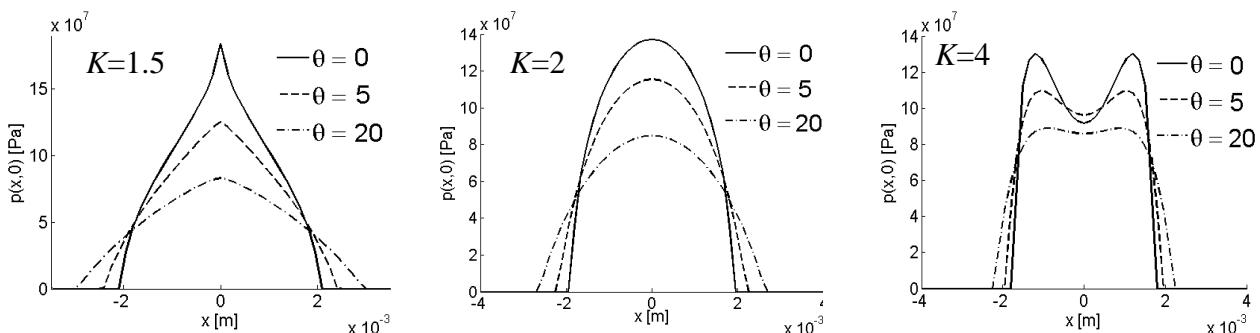


Рисунок 15 – Вплив розподілу зазорів в сполученні тіл обертання і податливості пружного шару на характер розподілу контактної тиску

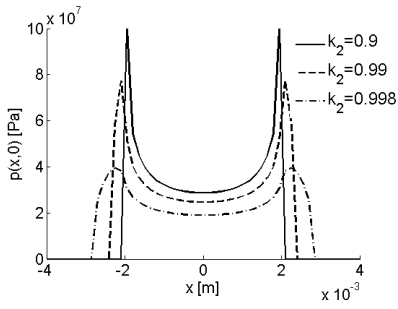


Рисунок 16 – Характерні розподіли контактної тиску при варіюванні параметра k_2

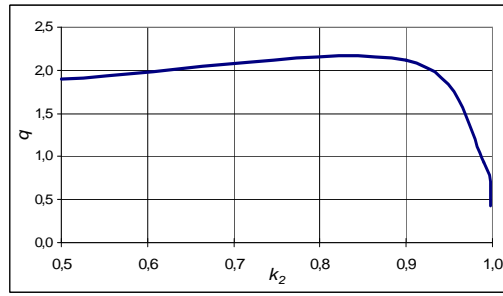


Рисунок 17 – Залежність відносного максимального контактної тиску від варіювання параметра k_2

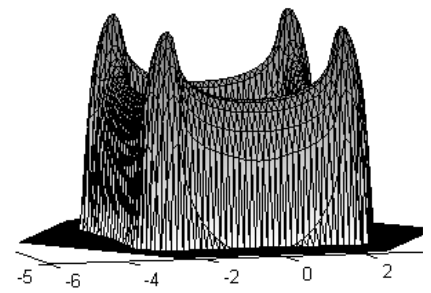


Рисунок 18 – Розподіл контактної тиску при $k_2 = 0.998$

зазору K і параметра податливості проміжного шару θ ($\text{tg } \theta = \lambda / C_{mm}$). Показано, що показник K ступеневої функції розподілу первинного зазору суттєво впливає як на характер розподілу контактної тиску, так і на його максимальні значення. При цьому, чим вище податливість проміжного пружного шару θ , тим екстремум стає менш різко виражений порівняно з випадком контакту гладких тіл.

Проведено дослідження контактної взаємодії прямокутного скругленого в плані штампа з напівпростором. Отримані характерні розподіли контактної тиску при варіюванні геометричних розмірів штампу та шорсткості представлені на рис. 16-18. Показано, що в області варіювання відбувається різка зміна як форми розподілу контактної тиску, так і його максимального значення, а також розмірів контактних майданчиків. Крім того, введено в розгляд пружний вінклерівський шар. Доведено, що урахування шару згладжує розподіл контактної тиску, причому тим більшою мірою, чим вища його податливість.

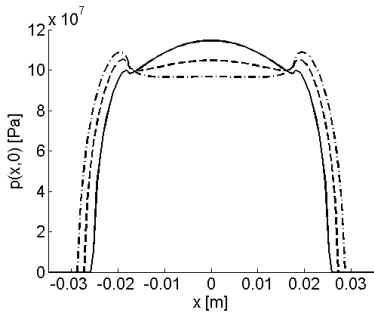


Рисунок 19 – Розподіл контактної тиску при варіюванні R_2

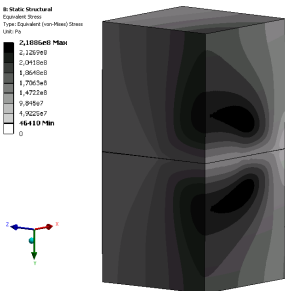


Рисунок 20 – НДС дворадіусного ролика: розподіл напружень за Мізесом

Проаналізована також контактна взаємодія підшипника кочення з модифікованим дворадіусним роликом. Оскільки ресурс роликового підшипника значною мірою визначається швидкістю зношування поверхонь кочення ролика і підшипникового кільця, то для зменшення швидкості зношення необхідно мінімізувати контактний тиск між поверхнею ролика і внутрішньою поверхнею підшипника. Проведено аналіз впливу геометрії контактної поверхні ролика на рівномірність розподілу контактної тиску. На отриманих картинах розподілу контактної тиску при варіюванні радіусу R_2 , які показані на рис. 19, видно, що у зоні переходу радіусів має місце сплеск контактної тиску, однак за умови постійного значення притискового зусилля можливо досягти вирівнювання форми контактної тиску за рахунок оптимізації геометрії ролика. Також досліджено напружено-деформований стан модифікованого ролика (рис. 20).

Однією із прикладних задач контактної взаємодії є дослідження взаємодії кульових поршнів з біговими

доріжками в ГОП танкової трансмісії. Проведено аналіз впливу профілю бігових доріжок на кільці статора (рис. 21), а також наявності шорсткого шару між контактуючими поверхнями спряжених тіл, на характер контактних зон і розподіл контактного тиску.

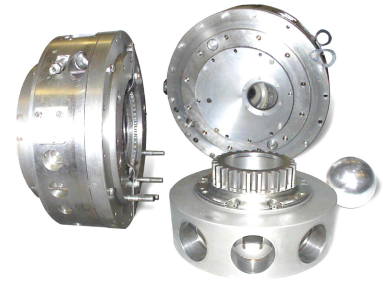


Рисунок 21 – Радіальна гідропередача ГОП-900

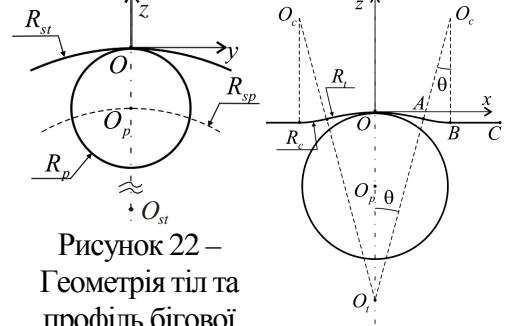


Рисунок 22 – Геометрія тіл та профіль бігової доріжки

Профіль бігової доріжки в центральній своїй частці є дугою кола радіуса R_c з кутовою величиною 2θ . Таким чином, середня частка бігової доріжки є жолобом тороїдальної форми, по якому перекочується поршень при обертанні ротора (рис. 22).

Варіювання безрозмірного радіусу бігової доріжки χ ($\chi = ((R_2 - R_1) / R_1) \cdot 100\%$) дало змогу встановити, що для випадку, коли радіус кривизни центральної частини доріжки менше радіусу поршня, контакт здійснюється за двома віддаленими майданчиками еліптичної форми. У випадку, коли

радіус бігової доріжки перевищує радіус поршня, спостерігається «герцевський» контакт, який порушується, як тільки пляма контакту виходить за межі центральної тороїдальної частини бігової доріжки на перехідну частину профілю. На рис. 23 показано, що варіювання відносної податливості L ($L = \lambda / C_{mm}$) істотно впливає і на характер розподілу, і на величину контактного тиску. З ростом податливості рівень тиску знижується, розміри контактної плями зростають, а розподіл контактного тиску стає більш гладким. Також отримана діаграма значень максимального контактного тиску, які передбачені теорією Герца та розв'язками МСЕ і МГПР, що демонструє межі застосовності цих методів в даному випадку. Зокрема, підтверджено, що МГПР є ефективним інструментом аналізу, який поєднує точність (рис. 24) та оперативність, оскільки кількість рівнянь МГЕ зменшується на порядки.

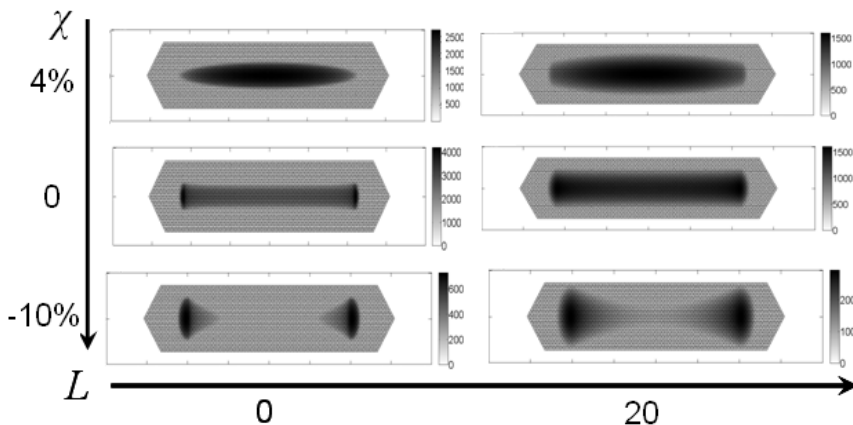


Рисунок 23 – Розподіли контактного тиску варіюванні радіусу бігової доріжки $\chi = ((R_2 - R_1) / R_1) \cdot 100\%$ та податливості $L = \lambda / C_{mm}$

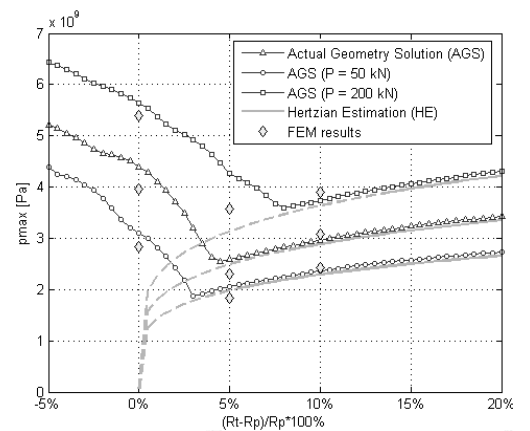


Рисунок 24 – Залежності максимального контактного тиску від параметру χ для різних навантажень, отримані різними методами

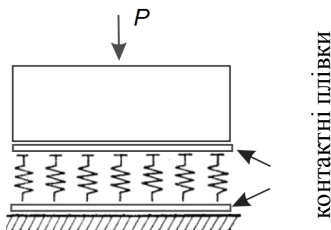


Рисунок 25 – Схема вимірювання контактної сили

Одержані в ході розв'язання описаних задач результати підтвердили ефективність, точність та адекватність запропонованих підходів, методів і моделей до дослідження НДС складнопрофільних тіл з урахуванням довільної форми зазору між контактуючими тілами та локальної податливості проміжного шару спряжених поверхонь.

У розділі 5 описаний комплекс експериментальних досліджень контактної взаємодії складнопрофільних тіл з наявністю податливого проміжного шару, який проводився на кафедрі теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин НТУ «ХП». Для дослідження контактної сили задіяна технологія контактних відбитків з використанням чутливих плівок фірми Fujifilm. Запропоновано проміжний пружний шар моделювати за допомогою гуми. Для обґрунтування адекватності такого моделювання проведено експеримент, у якому чутливі плівки розташовувались над шаром гуми і під ним, що відображає відповідність запропонованої експериментальної моделі з моделлю основи Вінклера (рис. 25). На рис. 26 представлені контактні відбитки та відповідні їм розшифровки, які отримані під час проведення експерименту. На рис. 27 показані відповідні цим випадкам розподіли контактної сили. Різниця між максимальними значеннями контактної сили, отриманими над шаром і під ним, склала 5 %, а між розмірами одержуваних контактних плям – менше одного відсотка. Таким чином, для проведення експериментів обґрунтовано вибір гуми як матеріалу проміжного пружного шару для зменшення потрібних для експерименту зусиль.

Проведено експеримент, в ході якого визначалася величина податливості шару гуми. Як макет використано циліндричний пуансон, який вдавлювався в плоску основу за допомогою гвинтової пари, а за допомогою мікрометра визначалися переміщення верхньої площини циліндричного пуансона залежно від прикладеного навантаження (рис. 28). Для моделювання різної податливості шару використовувалося від одного до трьох шарів гуми. Під час експерименту отримано величину податливості λ одного шару гуми, яка дорівнює $0,77 \cdot 10^{-11}$ м/Па. Порівняння з числовим розв'язком задачі запропонованим у роботі методом урахування наявності проміжного шару (рис. 29) свідчить, що розбіжність результатів склала не більше 10%.

Отримано ряд контактних відбитків і розподілів контактної сили у спряженні елементів гідрооб'ємної передачі. Проведені комплексні дослідження контактної взаємодії показали повну якісну відповідність прогнозованої розрахунково та зафіксованої

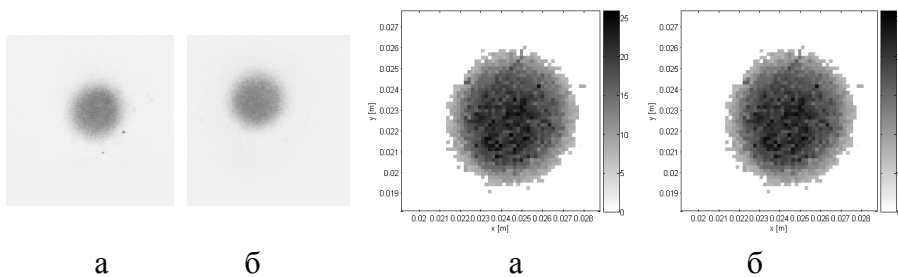


Рисунок 26 – Контактні відбитки та результати їх аналізу, які отримано над проміжним шаром (а) та під ним (б)

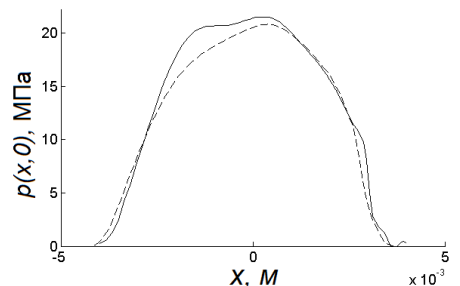


Рисунок 27 – Розподіл контактної сили над проміжним пружним шаром (—) та під ним (---)

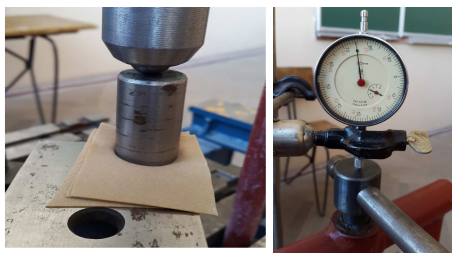


Рисунок 28 – Експериментальна установка для визначення величини податливості пружного шару

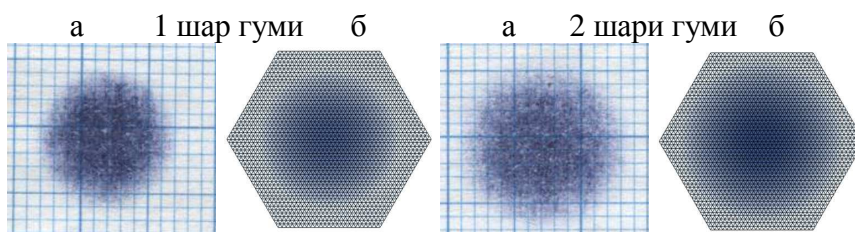


Рисунок 29 – Контактні плями в сполученні кулі з площиною (а) та і відповідні їм числові розв'язки задачі (б)

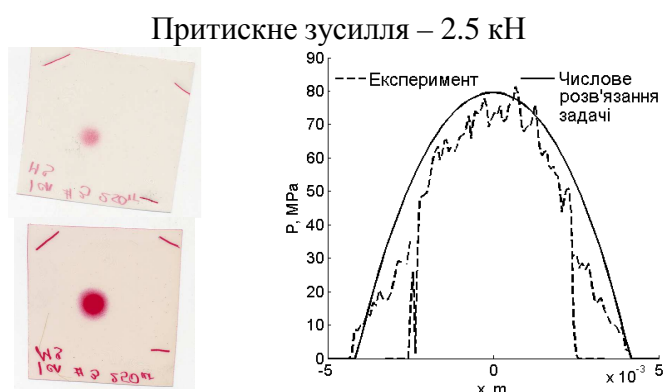


Рисунок 30 – Контактні відбитки, отримані під час експерименту, та порівняння розподілів контактного тиску отриманих експериментально та МГЕ

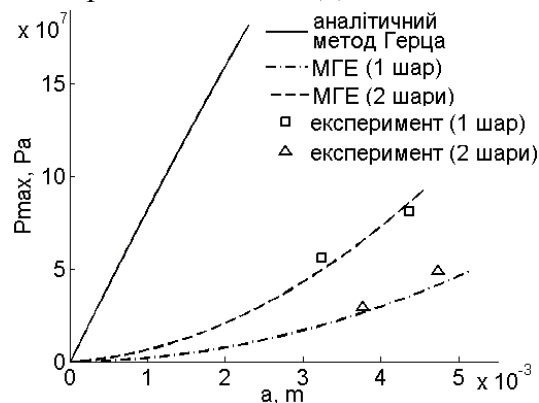


Рисунок 31 – Співставлення числових та експериментальних залежностей максимального контактного тиску від розміру контактної плями та податливості проміжного шару

експериментально поведінки контактних зон і тиску при варіюванні податливості проміжного шару та притискного зусилля (рис. 30, 31). Таким чином, за допомогою експериментальних досліджень продемонстрована адекватність запропонованих методів, достовірність та точність побудованих моделей, одержаних результатів досліджень складнопрофільних тіл з урахуванням податливості поверхневого шару, а також та підтверджені отримані результати числових досліджень, що проведені в роботі. Виявлена похибка становить близько 10%, а її вплив на загальний характер розподілу контактного тиску оцінюється як незначний.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлена та розв'язана науково-практична задача забезпечення конструкційної міцності машинобудівних конструкцій шляхом аналізу контактної взаємодії при різній локалізації контакту, формі контактуючих складнопрофільних тіл і податливості проміжного шару спряжених поверхонь. При цьому отримані наступні наукові результати.

1. На основі аналізу стану питання зроблені висновки про недостатні можливості існуючих методів визначення НДС елементів машинобудівних конструкцій, що представляють собою складнопрофільні тіла (СПТ) з урахуванням їх контактної взаємодії. Виходячи з цього, визначені задачі дисертаційних досліджень.

2. У роботі запропоновано новий підхід, фізична і математична модель НДС та контактної взаємодії СПТ з урахуванням сумісного впливу форми початкового зазору та

локальної податливості поверхневого шару спряжених деталей. При цьому запропоновано використовувати модель Вінклера для моделювання проміжного шару в загальній системі рівнянь методу граничних інтегральних рівнянь. Отримані співвідношення для дослідження контактної взаємодії шорстких складнопрофільних тіл як узагальнення аналітичної системи рівнянь та нерівностей для гладких тіл.

3. Розроблена в роботі комплексна математична модель НДС з урахуванням контактної взаємодії реалізована у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу на основі методу граничних елементів. Запропоновано співвідношення для урахування величини локальної податливості поверхневого шару та глобальної податливості контактуючих складнопрофільних тіл. В ході розв'язання низки тестових задач підтверджена висока точність та оперативність розробленого спеціалізованого програмно-модельного комплексу (похибка – 3÷5 %).

4. Із застосуванням спеціалізованого програмно-модельного комплексу розв'язано низку прикладних задач моделювання НДС з урахуванням контактної взаємодії складнопрофільних тіл та встановлені закономірності розподілу контактного тиску і контактних зон у спряженні цих тіл, які в багатьох випадках різко відрізняються від традиційних «герцевських» розподілів. При розв'язанні задачі про взаємодію елементів підшипника кочення з модифікованим роликом встановлено, що максимальний контактний тиск при використанні дворадіусного профілю знижується на 7 % порівняно з однорадіусним. Під час аналізу впливу профілю бігових доріжок ГОП та наявності шорсткого шару на розподіл контактного тиску встановлено, що при зусиллі 100 кН оптимальними параметрами для мінімізації контактного тиску є наступні: радіус бігової доріжки перевищує радіус поршня на 4 %, а шорсткість контактуючих поверхонь відповідає шліфовці. При дослідженні впливу форми розподілу зазору між тілами обертання встановлено, що для випадку розподілу у вигляді ступеневої функції з показником $1 < K < 2$ у центрі виникає гострий максимум; при $K=2$ – еліпсоїдальний розподіл із гладким максимумом; при $K > 2$ – локальний мінімум. При цьому розміщення податливого шару згладжує екстремуми, знижує максимуми контактного тиску та розширює контактну пляму. Такий якісний вплив кількісно проявляється тим різкіше, чим більша величина податливості проміжного шару. Також встановлено, що при скінченних розмірах контактуючих параболоїдів із зростанням притискного зусилля контактний тиск спочатку розподіляється, як у моделі Герца, а потім, коли контактна пляма підступає до границі тіла у плані, перетворюється практично у плато із рівномірним розподілом у середній частині та різким зниженням із наближенням до периферії. Максимальне його значення на другому етапі зростає при збільшенні притискного зусилля приблизно за лінійним законом. Дослідження контакту зубців продемонструвало позитивний вплив модифікації форми їхніх робочих поверхонь на контактну міцність зубчастих передач.

5. Експериментальні дослідження контактної взаємодії складнопрофільних тіл проводилися на спеціально розроблених стендах методом контактних відбитків з використанням чутливих до тиску плівок. Під час експериментального визначення контактних зон і контактного тиску при дослідженні взаємодії кульового поршня з біговою до-

ріжкою гідропередачі підтверджені якісні та кількісні ефекти зміни розподілу контактних зон і тиску при наявності і варіюванні податливості пружного шару між контактуючими тілами (похибка отриманих результатів – близько 10 %). Таким чином, отримано повне підтвердження адекватності математичних моделей, обґрунтованості вибору методів числових досліджень, відповідності створених моделей, а також достовірність і точність одержаних результатів.

6. Результати дисертації впроваджені в практику наукових досліджень НТУ «ХП» при виконанні бюджетних та господарсько-договірних тем, а також на підприємствах ПАТ «Азовмаш» та ПАТ «Карлівський машинобудівний завод».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Негрובה (Скріпченко) Н.Б. Кинематика механизмов наклона крупногабаритных машин: компьютерное моделирование и эксперимент / Т.В. Полицук, Н.А. Ткачук, Н.Б. Негрובה, В.И. Головченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2011. – № 22. – С. 86-103.

Здобувачем запропоновані числові моделі та проведені числові розрахунки для дослідження напружено-деформованого стану механізму нахилу сталеплавильної печі.

2. Негрובה Н.Б. (Скріпченко Н.Б.) Контактна взаємодія деталей машин з витягнутими контактними областями / Н.Б. Негрובה, М.А. Ткачук, М.М. Ткачук. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2011. – № 29. – С. 129-134.

Здобувачем проведені числові розрахунки, аналіз та узагальнення результатів сполучення тіл з витягнутими площадками.

3. Негрובה (Скріпченко) Н.Б. Влияние формы поверхностей контактирующих тел конечных размеров на распределение контактных давлений / Н.Б. Негрובה // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2011. – №51. – С. 98–102.

4. Негрובה (Скріпченко) Н.Б. Связанная задача анализа напряженно-деформированного состояния и геометрического синтеза для контактирующих сложнопрофильных тел / Н.Н. Ткачук, Н.А. Ткачук, О.В. Кохановская, Н.Б. Негрובה, А.А. Зарубина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – № 22. – С. 121-147.

Здобувачем проведено аналіз напружено-деформованого стану складнопрофільних тіл з урахуванням контактної взаємодії.

5. Негрובה (Скріпченко) Н. Б. Особенности распределения контактных зон и давлений при контакте тел конечных размеров по поверхностям близкой формы / Н.Н. Ткачук, Н.Б. Негрובה, Н.А. Ткачук. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – №36. – С. 164-169.

Здобувачем отримані характерні розподіли контактного тиску та їх максимальні значення при дослідженні контакту тіл скінченних розмірів.

6. Скрипченко Н.Б. Распределение контактных давлений при контакте тел конечных размеров по поверхностям близкой формы / Н.Б. Скрипченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – № 1. – С. 126-130.

7. Скрипченко Н.Б. Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов / Н.Б. Скрипченко, Н.Н. Ткачук, Н.А. Ткачук, Д. С. Мухин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – № 41. – С. 133-142.

Здобувачем запропоновані основні розв'язувальні співвідношення для моделювання жорсткості шорсткого шару.

8. Скрипченко Н.Б. Распределение контактных давлений при контакте тел конечных размеров по поверхностям близкой формы при варьировании контактных площадок / Н.Б. Скрипченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2014. – № 7. – С. 20-25.

9. Скрипченко Н.Б. Контакт сложнопрофильных тел: связанная задача анализа напряженно-деформированного состояния и геометрического синтеза / Н.Н. Ткачук, Н.Б. Скрипченко, Н.А. Ткачук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2014. – №14 – С. 155-169.

Здобувачем сформульовані основні співвідношення для аналізу контактної взаємодії складнопрофільних тіл.

10. Скрипченко Н.Б. Особенности распределения контактных давлений при контакте тел конечных размеров по поверхностям близкой формы при варьировании их геометрических размеров / Н.Б. Скрипченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП», – 2014. – № 22. – С. 127 - 131.

11. Скрипченко Н.Б. Модели и разрешающие соотношения для анализа контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов / Н.Н. Ткачук, Н.Б. Скрипченко, А.В. Ткачук, В.И. Головченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2014. – № 29. – С. 158-171.

Здобувачем розроблені комплексні математичні моделі для дослідження напружено-деформованого стану контактуючих шорстких тіл.

12. Скрипченко Н.Б. Контакт прямоугольного в плане пуансона со скругленными краями с полупространством / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук // Проблеми машинобудування. – Харків: – ПМАШ ім. А.М. Подгорного. – 2014. – №4. – С. 17-22.

Здобувачем проведено аналіз контакту прямокутного в плані пуансона з округленими кінцями з напівпростором, отримані залежності максимальних контактних тисків від варіювання геометричних параметрів.

13. Скрипченко Н.Б. Оценка влияния шероховатости на контактные давления в сопряжении сложнопрофильных тел / Н.Н. Ткачук, Н.Б. Скрипченко, А.В. Ткачук, С.Д. Крюков, А.С. Богач // Механіка та машинобудування. – Харків: НПКП «Механіка». – 2014 – №1 – С. 29-35.

Здобувачем отримані картини розподілу контактних тисків при різній формі початкового зазору спряжених поверхонь складнопрофільних тіл.

14. Скрипченко Н.Б. Проблема обеспечения защищенности корпусов легкобронированных машин: постановки и подходы к решению / Ю.М. Бусяк, А.В. Ткачук, Н.А. Дёмина, Н.Б. Скрипченко, И.В. Мазур // Проблемы машинобудування. – Харків: – ІПМАШ ім. А.М. Подгорного. – 2014. – том 18, №1. – С. 40-45.

Здобувачем проведено дослідження контактної взаємодії складнопрофільних тіл та проведено числові розрахунки.

15. Скрипченко Н.Б. Влияние формы беговой дорожки на контактное взаимодействие с шаровыми поршнями радиальной гидропередачи / Н.Б. Скрипченко, А.В. Ткачук, Н.Н. Ткачук, Е.И. Касай, Б.И. Крилюк // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 31. – С. 81-100.

Здобувачем проведено аналіз впливу форми бігової доріжки з кульовими поршнями радіальної гідропередачі на контактну взаємодію, досліджено вплив варійованих параметрів на розподіл контактних тисків.

16. Скрипченко Н.Б. Экспериментальное исследование контактного взаимодействия сложнопрофильных шероховатых тел с учетом податливости / Н.Б. Скрипченко, Н.Н. Ткачук, А.А. Атрошенко, Н.А. Ткачук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 34. – С. 124-130.

Здобувачем запропонована схема проведення експерименту з використанням чутливих до контакту плівки, проведено аналіз отриманих даних та їх співставлення з числовими результатами.

17. Скрипченко Н.Б. Расчетно-экспериментальная идентификация математических и численных моделей элементов сложных механических систем / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт”. – 2014. – № 2. – С. 3-9.

Здобувачем проведена обробка та оцінка результатів експериментальних досліджень, що отримані за технологією контактних відбитків.

18. Скрипченко Н.Б. Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 1. Поста-

новка задачи. 2. Кинематическая модель контакта гладких тел / Н.Н. Ткачук, И.Я. Мовшович, Н.А. Ткачук, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт”. – 2014. – № 3. – С. 3-10.

Здобувачем проведено аналіз впливу величини контактної жорсткості на розподіл контактних зон та контактного тиску.

19. Скрипченко Н.Б. Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 3. Прямой и вариационный методы решения задачи негерцевского нормального контакта гладких тел. 4. Модель контакта шероховатых тел / Н.Н. Ткачук, И.Я. Мовшович, Н.А. Ткачук, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт”. – 2014. – № 4. – С. 3-8.

Здобувачем проведено аналіз впливу величини контактної жорсткості на розподіл контактних зон та контактного тиску.

20. Скрипченко Н.Б. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт”. – 2014. – №6. – С. 10–16.

Здобувачем запропоновані підходи до використання багаторівневих моделей дослідження контактної взаємодії складнопрофільних тіл.

21. Скрипченко Н.Б. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости (продолжение) / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт”. – 2014. – № 7. – С. 11–20.

Здобувачем отримані залежності значень максимального контактного тиску при варіюванні форми початкового зазору між контактуючими тілами.

22. Скрипченко Н.Б. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости (окончание) / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт”. – 2014. – № 8. – С. 6-8.

Здобувачем проведено аналіз результатів та отримані залежності значень максимального контактного тиску при розв'язанні контактних задач різними методами.

23. Skripchenko N. Numerical tools for analysis of complex-shaped bodies in mechanical contact / М.А. Tkachuk, N. Skripchenko, A. Grabovskiy, М.М. Tkachuk // Book of Proceedings of the 56th International Conference of Machine Design

Departments (ICMD 2015), (Nitra, 9-12 September 2015) – Slovak University of Technology Bratislava. – 2015. – P. 393-398.

Здобувачем отримані закономірності зміни форми контактного тиску залежно від закону розподілу первинного зазору, а також урахування шорсткості.

24. Негрובה (Скріпченко) Н. Б. Контактна взаємодія елементів машин з витягнутими опорними площадками (пленарна доповідь) / М.А. Ткачук, Н.Б. Негрובה, Т.В. Поліщук. // X Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Праці. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2011. – С. 21-22.

Здобувачем запропонована ідея параметризації для дослідження контактної взаємодії тіл обертання, початковий зазор не є герцівським.

25. Негрובה (Скріпченко) Н.Б. Параметричні моделі механізму нахилу плавильної печі: контактна взаємодія і напружено-деформований стан при різних кутах нахилу /Н.Б. Негрובה // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І – Харків, НТУ «ХП», 2011. – С. 178.

26. Негрובה (Скріпченко) Н.Б. Визначення напружено-деформованого стану механізму нахилу технологічних машин з урахуванням контактної взаємодії / Т.В. Поліщук, В.І. Головченко, Є.М. Барчан, Н.Б. Негрובה // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І – Харків, НТУ «ХП», 2012. – С. 200.

Здобувачем побудовані скінченно-елементні моделі та проведено дослідження контактної взаємодії механізму нахилу технологічних машин.

27. Скріпченко Н. Варіант методу граничних елементів для аналізу контактної взаємодії гладких і шорстких тіл / Н. Скріпченко, М. Ткачук // XI Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2013. – С. 84-85.

Здобувачем розглянуто варіант методу граничних елементів для контактних задач та запропонована ідея урахування податливості шорсткого шару.

28. Скрипченко Н.Б. Разрешающие соотношения метода граничных элементов для анализа контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел / Н.А. Ткачук, Н.Б. Скрипченко, В.Н. Шеремет, Н.Н. Ткачук, И.Я. Мовшович // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І – Харків, НТУ «ХП», 2013. – С. 254.

Здобувачем запропоновано моделювання податливості проміжного шару контактуючих поверхонь за допомогою основи Вінклера.

29. Скріпченко Н.Б. Контактна взаємодія індентора з перешкодою / О.В. Литвиненко, М.М. Ткачук, Н.Б. Скріпченко, О.В. Кохановська, О.В. Веретельник // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ. Збірка тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції 14-16 травня 2014 р.– Львів: АСВ ім. гетьмана П. Сагайдачного, 2014. – С. 53-54.

Здобувачем проведено розв'язання низки контактних задач та отримані картини розподілу контактного тиску при взаємодії індентора з перешкодою.

30. Скрипченко Н.Б. Влияние свойств шероховатого слоя на контакт сложнопрофильных упругих тел / Н.Б. Скрипченко, Н.Н. Ткачук, Н.А. Ткачук, Л.Н. Бондаренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І – Харків, НТУ «ХП», 2014. – С. 235.

Здобувачем отримані залежності контактного тиску, а також контактних площин при варіюванні величини контактної жорсткості.

31. Скрипченко Н.Б. Влияние свойств упругого слоя на распределение контактных давлений при контактном взаимодействии сложнопрофильных тел / Н.Б. Скрипченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І – Харків, НТУ «ХП», 2015. – С. 220.

Здобувачем проведено аналіз впливу пружного шару на розподіл контактного тиску, а також на максимальне їх значення.

32. Скрипченко Н.Б. Контакт складнопрофільних гладких та шорстких тіл: моделі, методи, ефекти (пленарна доповідь) / М.М. Ткачук, Н.Б. Скрипченко, М.А. Ткачук // XII Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Праці. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. – С. 8-9.

Здобувачем розроблені комплексні математичні моделі та методи для дослідження напружено-деформованого стану контактуючих шорстких тіл.

АНОТАЦІЇ

Скрипченко Н.Б. Контактна взаємодія складнопрофільних деталей машинобудівних конструкцій з урахуванням локальної податливості поверхневого шару. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2016.

Дисертація присвячена розробці підходів, методів і моделей для дослідження напружено-деформованого стану складнопрофільних тіл з урахуванням їхнього контакту по шорстких поверхнях. У роботі розв'язана задача аналізу контактної взаємодії складнопрофільних елементів машинобудівних конструкцій за наявності локальної податливості поверхневого шару. Для цього запропоновано варіант методу граничних рівнянь, в який додана модель пружного проміжного шару за Вінклером. Отриманий метод дослідження контактної взаємодії об'єднує в рамках єдиних спів-

відношень «локальні» та «глобальні» характеристики податливості контактуючих шорстких тіл.

Числова реалізація методу граничних елементів здійснена в спеціалізованому програмно-модельному комплексі для дослідження контактної взаємодії складнопрофільних тіл. Розв'язано низку прикладних задач аналізу контактної взаємодії, а саме проведено дослідження впливу форми зазору і податливості шорсткого шару на характер розподілів контактного тиску у наступних випадках: контакту прямокутного в плані штампа з округленнями з плоскою поверхнею, спряження підшипника кочення з модифікованим дворадіусним роликком, передачі зусиль між кульовими поршнями та біговими доріжками в гідрооб'ємній передачі танкової трансмісії.

Проведене порівняння отриманих числових результатів досліджень з експериментальними даними. Підтверджено точність і достовірність запропонованих методів та моделей, а також створеного програмно-модельного комплексу.

Ключові слова: прикладна теорія пружності, міцність машин, напружено-деформований стан, контактна взаємодія, шорсткість, складнопрофільне тіло, податливість, основа Вінклера, метод граничних інтегральних рівнянь, метод скінченних елементів.

Скрипченко Н.Б. Контактное взаимодействие сложнопрофильных деталей машиностроительных конструкций с учетом локальной податливости поверхностного слоя. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Министерство образования и наук Украины, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена разработке подходов, методов и моделей для исследования напряженно-деформированного состояния сложнопрофильных шероховатых тел с учетом контактного взаимодействия.

В работе решена задача анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных элементов машиностроительных конструкций с учетом дополнительных факторов влияющих на распределение контактных давлений (учет податливости поверхностного слоя, конечность размеров контактирующих тел). Предложено для анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел применять вариант метода граничных уравнений, дополненный моделью учета податливости промежуточного слоя. Для моделирования упругого слоя применена модель Винклера. Предложенный метод исследования контактного взаимодействия объединяет в рамках единых соотношений «локальные» и «глобальные» характеристики податливости контактирующих шероховатых тел.

Также поставлена и решена задача об оперативном анализе контактного взаимодействия тел с учетом конечности размеров сопрягаемых деталей. Получен инструмент аналитических и численных исследований, позволяющий решать задачу анализа влияния различных факторов на характер распределения контактных давлений. Показана возможность создания общей базы данных, включающей в себя зависимости изменения контактных площадок и максимальных контактных давлений от геометрических и силовых параметров контактирующих тел.

Осуществлена численная реализация метода граничных элементов и создан специализированный программно-модельный комплекс (СПМК) для исследования контактного взаимодействия сложнопрофильных тел. Проведено сравнение решения предложенного варианта метода граничных элементов с аналитическим решением задач, а также с методом конечных элементов. Оценена погрешность численного решения в зависимости от размера ячейки s . На примере этих задач подтверждена работоспособность и применимость, а также точность и оперативность СПМК применительно к решению контактных задач с учетом дополнительных факторов.

Решен ряд прикладных задач анализа контактного взаимодействия, а именно проведено исследование влияния формы зазора и податливости шероховатого слоя на характер распределений контактных давлений, проведено исследование контактного взаимодействия прямоугольного в плане штампа со скруглениями, решена задача контакта подшипника качения с модифицированным двурadiusным роликом, проведен анализ взаимодействия шаровых поршней с беговыми дорожками гидрообъемной передачи танковой трансмиссии.

Во время выполнения работы проведен ряд экспериментальных исследований для анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных элементов машиностроительных конструкций с учетом податливости шероховатого слоя. Для исследования контактных давлений задействована технология контактных отпечатков с использованием чувствительных пленок. Проведено сравнение полученных численных результатов исследований с полученными экспериментальными данными. Подтверждена точность и достоверность предложенных методов и моделей, а также созданного программно-модельного комплекса.

Ключевые слова: прикладная теория упругости, прочность машин, напряженно-деформированное состояние, контактное взаимодействие, шероховатость, сложнопрофильных тело, податливость, основание Винклера, метод граничных интегральных уравнений, метод конечных элементов.

Skripchenko N. Contact interaction of complex-shaped details of engineering structures with local compliance of the surface layer. – With manuscript rights.

The thesis in qualification for a scientific degree of Candidate of Technical Science in speciality 05.02.09 – dynamics and strength of machines, National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to development of approaches, methods and models for analysis of stress-strain state of complex-shaped bodies with account for their contact over rough surfaces. In the present work the contact problem is solved for complex-shaped elements of engineering structures with local compliance of the surface layer. For this purpose a variation to the boundary integral equations method extended with a Winkler-type model of elastic layer is proposed. The resulting approach combines in a unified formulation the "local" and "global" compliance characteristics of the contacting rough bodies.

The numerical implementation of the boundary element method is included in a software-and-model complex for analysis of contact interaction of complex-shaped bodies. A number of applied contact problems is solved. Namely, the influence of the gap and rough layer compliance on the contact pressure distribution is studied for the following cases: contact of a rectangular round-end stamp with a flat surface, junction of a rolling bearing and a modified double-radius roller, normal traction between spherical pistons and treadmills of a tank transmission.

Numerical results of the research are compared to experimental data. Accuracy and reliability of the proposed methods and models, as well as special-purpose software-and-model complex are confirmed.

Keywords: applied theory of elasticity, strength of machines, stress-strain state, contact interaction, roughness, complex-shaped body, compliance, Winkler's foundation, the method of boundary integral equations, the finite element method.



Відповідальний за випуск
к.т.н., проф. кафедри теорії і систем автоматизованого проектування
механізмів і машин НТУ «ХП»
Зарубіна А.О.

Підписано до друку 11.01.2016 р.
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 64

Надруковано в друкарні ФО-П Дуюнова Т.В.
63023, м. Харків, вул. Весніна, 12.
Тел. (057) 717-28-80
e-mail: promart_order@ukr.net
