

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Ткачук Микола Миколайович

УДК 539.3

**АНАЛІЗ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ
З КІНЕМАТИЧНО СПРЯЖЕНИМИ ПОВЕРХНЯМИ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Львов Геннадій Іванович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», завідувач кафедри
динаміки та міцності машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Зайцев Борис Пилипович,
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного
НАН України, м. Харків,
провідний науковий співробітник
відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень

кандидат технічних наук, доцент,
Трубачев Сергій Іванович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,
доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів

Захист відбудеться « 23 » лютого 2011р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

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

Автореферат розісланий « 21 » січня 2011р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ В.Г. Сукіасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для сучасного машинобудування характерне широке застосування машин, у яких передача необхідних складних видів руху і значних робочих зусиль здійснюється за допомогою контакту складнопрофільних деталей. При цьому форма робочих поверхонь цих деталей визначається, по-перше, умовами кінематичного спряження, а по-друге, вимогами забезпечення міцності з урахуванням реальних розподілів контактної тиску.

При проектуванні таких елементів машин виникають дві зв'язані задачі: I – аналізу напружено-деформованого стану (НДС) складнопрофільних тіл (СПТ) з урахуванням їхньої контактної взаємодії; II – геометричного синтезу їхніх кінематично генерованих поверхонь (КГП). Існуючі методики розв'язання задач I і II не забезпечують *варіативності* при описі форми тіл, мають недосконалі механізми *інтеграції* геометричних і розрахункових моделей і є недостатньо *збалансованими* за точністю та обчислювальними ресурсами на різних етапах досліджень. Унаслідок першої обставини виникають складнощі при автоматизації процесу створення моделей для аналізу контактної взаємодії проєктованих деталей при проведенні багатоваріантних досліджень. Друга служить перешкодою для встановлення зворотного зв'язку задачі аналізу НДС з задачею геометричного синтезу при організації процедури ітераційного пошуку форми елементів машин за кінематичним критерієм. Третій чинник часто є причиною невиправданого збільшення витрат обчислювальних ресурсів або низької точності кінцевого результату унаслідок нераціонального вибору методів досліджень.

У зв'язку з цим удосконалення методів аналізу контактної взаємодії і геометричного синтезу СПТ з КГП є *актуальним* науковим і практичним завданням, а вирішення вказаних задач визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася у Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” (НТУ „ХПІ”) згідно з планом фундаментальних та прикладних НДР МОН України: „Розробка математичних моделей та методів розрахунку нелінійного деформування і пошкоджуваності елементів конструкцій при інтенсивних навантаженнях” (ДР № 0106U001473); „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 у рамках господарських договорів: „Розробка математичної, геометричної і скінченно-елементної моделі для дослідження кінематики та НДС елементів макету механізму нахилу плавильної печі” (ВАТ „Азовмаш” та „Головний спеціалізований конструкторсько-технологічний інститут” (ГСКТІ), м. Маріуполь); „Розробка методів математичного моделювання поведінки елементів об'єктів бронетанкової техніки під дією розподіленого навантаження для забезпечення їхньої захищеності” (ХКБМ ім. О.О. Морозова, м. Харків). У даних роботах здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. *Мета роботи* полягає у вдосконаленні та реалізації методів розв'язання зв'язаної задачі аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням контактної взаємодії і геометричного синтезу складнопрофільних елементів машинобудівних конструкцій з кінематично генерованими поверхнями на основі параметричного опису та інтеграції розрахункових моделей різного рівня.

Для досягнення поставленої мети розв'язані наступні завдання:

1. На основі аналізу існуючих методів обґрунтувати шляхи дослідження напружено-деформованого стану складнопрофільних тіл з кінематично генерованими поверхнями.
2. Розробити підхід та комплексні математичні моделі напружено-деформованого стану з урахуванням контакту складнопрофільних тіл з кінематично генерованими поверхнями.
3. Розробити числові алгоритми на основі запропонованих математичних моделей НДС складнопрофільних тіл з кінематично генерованими поверхнями.
4. Провести аналіз напружено-деформованого стану складнопрофільних тіл з КПП та встановити закономірності розподілу контактної тиску і контактних зон.
5. Провести експериментальне дослідження контактної взаємодії СПТ і впровадження результатів дисертаційних досліджень у виробництво.

Об'єкт дослідження: напружено-деформований стан складнопрофільних тіл з кінематично генерованими поверхнями в процесі контактної взаємодії.

Предмет дослідження: методи розв'язання зв'язаних задач контактної взаємодії і геометричного синтезу складнопрофільних тіл з КПП, а також визначення закономірностей НДС, розподілу контактних зон і контактної тиску.

Методи дослідження. У роботі використовуються метод Герца, метод скінченних елементів (МСЕ) і метод граничних елементів (МГЕ) для моделювання контактної взаємодії СПТ; методи твердотільного 3D моделювання для створення параметричних моделей досліджуваних тіл та кінематичний метод геометричного синтезу для визначення форми спряжених поверхонь. Для визначення зон контакту і контактної тиску застосовувалися методи варіаційних нерівностей, методи опуклого програмування, методи колокації та активних обмежень. Експериментальне дослідження контактної взаємодії проводилося методом контактних відбитків на основі технології чутливих плівок. Лабораторні зразки створювалися методами автоматизованого прототипування тіл складної форми. Комплекс числових досліджень проводився в середовищі програми ANSYS (ліцензія НТУ „ХП” від фірми EMT U, м. Київ, 2010 р.) та із застосуванням SolidWorks (сертифікат № SEN0213 18/02-2006, ліцензія серійний № 9710 0044 1189 7468).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- удосконалено метод розв'язання зв'язаної задачі аналізу НДС з урахуванням контактної взаємодії і синтезу спряжених поверхонь тіл з КПП, що відрізняється від традиційних єдиним підходом до опису геометричних і числових моделей досліджуваних тіл;
- одержав подальший розвиток метод параметричного моделювання кінематично генерованих поверхонь, який полягає в алгоритмічному описі поточних варіантів на основі розв'язання спеціальної задачі геометричного синтезу в криволінійних координатах, що дає змогу аналітично обчислювати локальні та глобальні властивості поверхонь;
- вперше запропонована методологія автоматизованого генерування СЕМ досліджуваних тіл шляхом створення топологічно регулярних сіток у внутрішніх координатах КПП, що відрізняється підвищеною точністю розташування вузлів на контактуючих поверхнях;
- одержав подальший розвиток МГЕ, що полягає в уточненому підході до аналітичного обчислення коефіцієнтів матриці впливу та зазору між контактуючими поверхнями;

– одержав розвиток метод інтеграції розрахункових моделей різного рівня складності в єдиному процесі дослідження контактної взаємодії і синтезу спряжених поверхонь тіл з КПП, який відрізняється від традиційних методик наявністю критеріального підходу для обґрунтованого вибору методів, використовуваних на різних етапах дослідження;

– установлені особливості форми, а також на конкретних прикладах продемонстровані якісні зміни топології контактних зон і розподілу контактного тиску у спряженні СПТ з КПП при зміні їх геометричної форми, розмірів та величини навантаження.

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

- 1) розроблений і реалізований алгоритм розв'язання практично важливих задач розрахунку напружено-деформованого стану при проектуванні елементів конструкцій з КПП;
- 2) на прикладі розв'язання конкретних задач отримані рекомендації з проектування дослідних зразків гідрооб'ємних (ГОП) та двохпараметричних передач (ДПП), силових ланцюгів, які привели до створення працездатних конструкцій з високими технічними характеристиками, що підтверджує ефективність запропонованого в роботі підходу та його практичну застосовність;
- 3) запропонований в роботі підхід володіє достатньою універсальністю і застосовністю для розв'язання задач обґрунтування проектних параметрів широкого класу контактуючих тіл, які здійснюють погоджений рух по поверхнях спряження.

Результати досліджень впроваджені у практику проектно-дослідницьких робіт у Харківському бронетанковому ремонтному заводі (ХБРЗ), ВАТ „Азовмаш” та науково-дослідної частини НТУ „ХПІ”, від яких отримані акти впровадження.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення і основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Серед них, зокрема: обґрунтування методів розв'язання контактної задачі, їх реалізація та результати числових досліджень; розробка структури і реалізація програмно-модельного комплексу для геометричного синтезу і аналізу НДС складнопрофільних тіл; постановка і розв'язання задачі синтезу та аналізу для тіл шуканої форми. Загальна постановка та обговорення результатів дисертаційної роботи здійснені спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати та положення роботи доповідались на міжнародних науково-практичних конференціях (МНТК): XIV-XVIII-й МНТК „Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (м. Харків, 2006-2010 рр.); МНТК „Актуальные проблемы прикладной математики и механики” (м. Харків, 2006 р.); VIII, IX міжнародних симпозіумах українських інженерів-механіків (м. Львів, 2007, 2009 рр.); 38th-41th МНТК „Проблеми якості та довговічності зубчастих передач, редукторів, їх деталей і вузлів” (м. Севастополь, 2007-2010 рр.); МНТК пам'яті академіка В.І. Моссаковського „Актуальні проблеми механіки суцільного середовища та міцності конструкцій” (м. Дніпропетровськ, 2007 р.); МНТК „Машинобудування та техносфера XXI століття” (м. Севастополь, 2007 р.); III Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике (м. Мінськ, 2007 р.); 9th ежегодной МНТК SolidWorks в России по САПР/PLM (м. Москва, 2007 р.); МНТК „Современные проблемы машиноведения” (м. Луганск, 2008 р.); НТК „Перспективи розвитку озброєння і військової техніки в Збройних Силах України”, (м. Львів, 2008 р.); МНТК „Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій” (м. Львів, 2008 р.); МНТК „Динаміка, надійність і довговічність механічних і біомеханічних систем та елементів їхніх конструкцій” (м. Севастополь, 2009 р.);

МНТК „Университетская наука-2010” (м. Маріуполь, 2010 р.); МНТК „Новые наукоемкие технологии, оборудование и оснастка для обработки материалов давлением” (м. Краматорськ, 2010 р.), 3^й міжнародній конференції з нелінійної динаміки „ND-KhPI2010” (м. Харків, 2010 р.), 81st Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (Karlsruhe, Germany, 2010).

Публікації. Основні наукові положення і результати дослідження за темою дисертаційної роботи опубліковані в 24 наукових працях, серед яких 19 у наукових фахових виданнях ВАК України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, додатків, списку використаних літературних джерел. Повний обсяг дисертації складає 203 сторінки, у тому числі 86 рисунків у тексті, 32 рисунки і 4 таблиці окремо на 16 сторінках, 4 додатки на 15 сторінках, 191 найменування використаних літературних джерел на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтована актуальність теми дисертації, її наукова та практична цінність, сформульована мета і окреслені задачі досліджень.

Розділ 1 містить аналіз та узагальнення методів дослідження контактної взаємодії тіл з кінематично генерованими поверхнями.

Проведено аналіз можливостей та обмежень класичної теорії Герца, методів варіаційних нерівностей, множників Лагранжа, граничних інтегральних рівнянь (МГІР) та інших, що широко застосовуються для розв’язання задач контактної взаємодії тіл довільної форми. Визначено можливості таких числових методів як МСЕ та МГЕ для моделювання НДС складнопрофільних тіл. Проведено аналіз та узагальнення методів геометричного синтезу поверхонь тіл, що знаходяться в рухомому контакті (т.з. кінематично генеровані поверхні).

Установлено, що для розв’язання задач контактної взаємодії такого типу тіл можуть бути застосовані методи Герца, скінченних та граничних елементів (МГЕ), але вони потребують відповідної адаптації. Систематизовані переваги і недоліки та установлені способи адаптації даних методів, що особливо проявляються при розв’язанні задач контактної взаємодії тіл з КГП. Для даних тіл поверхні, що перебувають у контакті, визначаються на основі розв’язання окремої задачі синтезу їхньої геометрії (наприклад, кінематичного методу Литвина) для хмари точок, що перебувають у парних контактах. Оскільки основна складність полягає якраз в особливості способу опису поверхонь тіл, то для розв’язання задачі аналізу контактної взаємодії необхідно розробити методи, що враховують дану особливість. Відповідно визначені основні задачі дисертаційних досліджень, розв’язані в подальших розділах.

У *розділі 2* описані теоретичні основи аналізу напружено-деформованого стану складнопрофільних тіл з кінематично генерованими поверхнями.

Для тіл з КГП доцільно об’єднати в рамках єдиного підходу аналіз НДС з урахуванням контактної взаємодії та геометричний синтез. Загальний підхід до розв’язання зв’язаної задачі для СПТ з поверхнями, що кінематично генеруються, передбачає проведення великої кількості багатоваріантних розрахунків. Для проведення подібної серії досліджень необхідні ефективні методи синтезу і аналізу, які б одночасно забезпечували належну точність і володіли високою швидкістю виконання. У роботі вибір методу геометричного синтезу зроблений на користь кінематичного методу Литвина.

Для розв'язання задач аналізу контактної взаємодії пропонується залучити декілька методів, об'єднавши їх єдиним методологічним підходом, що враховує специфіку створення геометричної моделі для досліджуваних тіл. В межах запропонованого загального підходу виділяються окремі задачі, що вимагають розв'язання з урахуванням специфіки досліджуваних СПТ: розробка методів автоматизованого створення скінченно-елементних моделей (СЕМ); розробка методів геометричного синтезу, вбудованих у загальну структуру досліджень; вибір, адаптація та порівняльний аналіз методів дослідження НДС з урахуванням контактної взаємодії.

Особлива увага приділена питанню розробки скінченно-елементних моделей СПТ, методів автоматизованої генерації та параметризованого опису. Наголошується, що ситуація ускладнюється при дослідженні складнопрофільних просторових елементів конструкцій, коли вже сам етап геометричного синтезу настільки складний, що про автоматизацію, параметризацію і керування сіток не може бути і мови, особливо для якісних призматичних СЕМ. Аналіз представленої на рис. 1 схеми, а саме парних відношень відповідних характеристик (критеріїв), дозволяє розкрити властиві даному процесу протиріччя: спроба поліпшити одну з характеристик моделі, як правило, вступає в конфлікт з вимогою зберегти іншу характеристику. При цьому, по-перше, компромісні варіанти не дають задовільного розв'язку ні за жодним з критеріїв, а по-друге, навіть при встановленні пріоритету однієї з характеристик I-IV вступає в дію відповідне обмеження (на рис. 1 вони периферійні).

На рис. 2 наведена структурна схема проектних досліджень для тіл з різними способами опису геометричної та СЕМ. Якщо в операторному вигляді рівняння стану записати як $L(\Omega, \mathbf{u}, \mathbf{p}, \mathbf{r}, t) = 0$, де Ω – область, займана тілами; \mathbf{u} – змінні стану; \mathbf{p} – параметри; \mathbf{r}, t – просторові і часова координати; то можна виділити 2 (I і III) основних традиційних способи опису Ω , коли вона конструюється із заздалегідь відомих примітивів, тобто описується у вигляді сукупності підобластей простої форми Ω_i . Складнішим є спосіб II – алгоритмічний, коли розв'язання задачі аналізу НДС і геометричного синтезу записується у вигляді послідовності операторів:

$$L_1|_{\Omega}(\mathbf{u}, \mathbf{p}, \mathbf{r}, t) = 0; \quad (1)$$

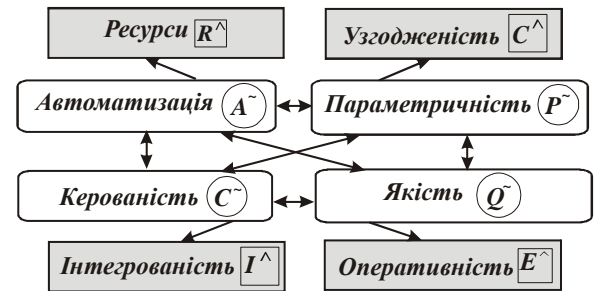


Рис. 1. Якісні характеристики СЕМ та відповідні проблемні обмеження

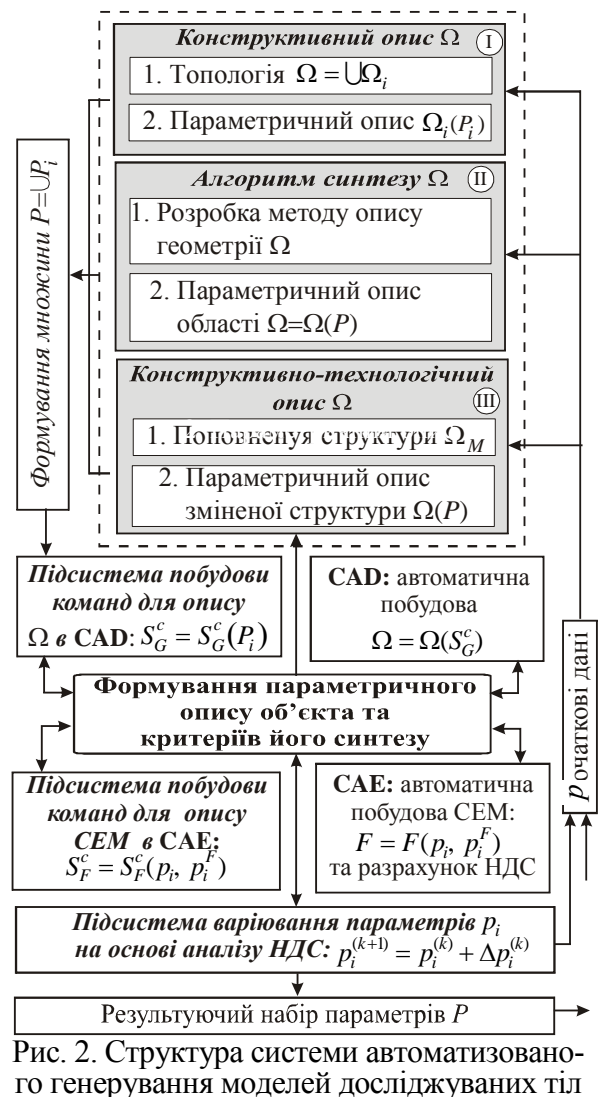


Рис. 2. Структура системи автоматизованого генерування моделей досліджуваних тіл

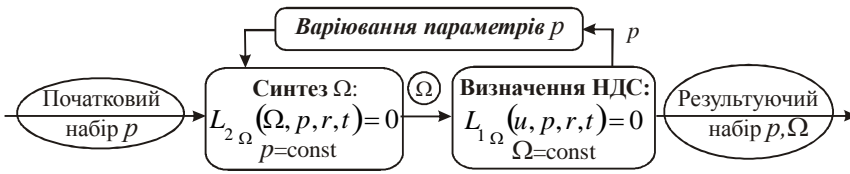


Рис. 3. Структура ітераційного розв'язання задачі геометричного синтезу та аналізу НДС складнопрофільних тіл з КПП

$$L_2|_{\bar{\Omega}}(\Omega, \mathbf{p}, \mathbf{r}, t) = 0. \quad (2)$$

У цьому випадку розрахунок НДС елементів досліджуваних тіл утруднений не лише складністю області Ω , але і тим, що сама ця область є шуканою, причому для її синтезу потрібне розв'язання досить складної нелінійної задачі. У даному

випадку зв'язаність задачі можна здійснити у вигляді послідовності розв'язань задач (2), (1) (саме у такій послідовності). При цьому на першому етапі Ω – шукана, $p = \text{const}$; на другому – u – шукані, $\Omega = \text{const}$, потім $p = \text{var}$. Відповідно саме розв'язання розбивається на послідовність хоч і залежних етапів, але ця залежність проявляється лише в моменти передачі даних між етапами досліджень (рис. 3).

Як оператор задачі геометричного синтезу робочих поверхонь одного тіла за заданою формою спряжених поверхонь іншого тіла $\bar{\Omega}$ виступає умова компланарності вектора відносної швидкості V_0 точок спряжених поверхонь: $\mathbf{n}(a) \times V_0(b) = 0$, де \mathbf{n} – вектор нормалі, що визначає дотичну площину. Кожен з векторів у цьому векторному добутку визначається через 2 параметри: \mathbf{a} – відомих; \mathbf{b} – шуканих. Область Ω представляється у вигляді регулярної хмари точок T_k – розв'язків рівняння. У роботі розроблена адаптація відомих постановок задач синтезу геометрії СПТ з КПП на основі кінематичного методу Литвина, що відрізняється від інших варіантів його застосування тим, що з самого початку націлений не лише на відновлення геометричної форми спряжених поверхонь, але й на підготовку геометричної моделі як основи для побудови розрахункових.

Контактна взаємодія тіл з КПП форми відноситься до випадку контакту тіл з гладкою границею. Для його

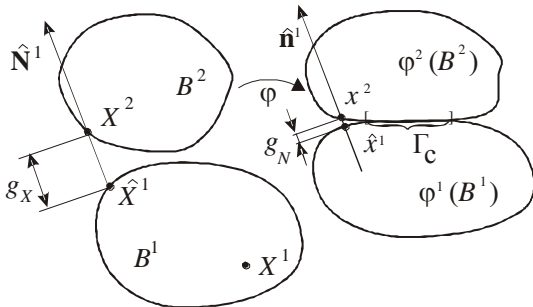


Рис. 4. Кінематика контакту гладких тіл

дослідження залучається традиційне представлення механізму контакту, що базується на лагранжевому описі деформації. Для точки поверхні x^2 одного з тіл записується умова непроникнення: відрізок, що сполучає її з найближчою точкою \hat{x}^1 тіла B^1 , направлений у зовнішність області B^1 : $g_N = (x^2 - \hat{x}^1) \cdot \hat{\mathbf{n}}_1 \geq 0$ (рис. 4). Традиційно це співвідношення об'єднується з обмеженнями на знак контактного тиску

і записується як умова Герца-Синьоріні для нормального контакту без тертя, що природним чином повторює умови Куна-Таккера в задачах опуклого програмування: $g_N \geq 0$; $p_N \leq 0$; $p_N g_N = 0$. Задача квазістатичного контакту двох пружних тіл за відсутності тертя може бути поставлена як крайова:

$$\text{Div } \sigma = 0, X \in B, \quad (3) \quad 2\varepsilon(\mathbf{u}) = (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T), \quad (4) \quad \sigma_{ij}(\mathbf{u}) = E_{ijkl} \varepsilon_{kl}(\mathbf{u}). \quad (5)$$

з умовами різного типу на ділянках границі Γ : кінематичні (Діріхле) $\mathbf{u} = \mathbf{u}_\Gamma, X \in \Gamma_u$; умови контакту $\{u_N - g \leq 0; p_N \leq 0; \{(u_N - g) \cdot p_N = 0; X \in \Gamma_c\}$; силові (Неймана) $\sigma \mathbf{n} = \mathbf{t}_\Gamma, X \in \Gamma_\sigma$. Тут $\mathbf{u}, \sigma, \varepsilon, E$ – вектор переміщень, тензори напружень, деформацій та пружних констант матеріалів. Проте більш загальною є варіаційна постановка. Для випадку двох тіл шуканим полем переміщень є $\mathbf{u} \in K$, де

$K = \{ \mathbf{v} : \mathbf{v} \in H^1(B^1) \times H^1(B^2), \mathbf{v}|_{\Gamma_u^1} = \mathbf{u}_\Gamma^1, \mathbf{v}|_{\Gamma_u^2} = \mathbf{u}_\Gamma^2, (\mathbf{v}^2 - \hat{\mathbf{v}}^1) \Big|_{\Gamma_c} \hat{\mathbf{n}}^1 + g_X \geq 0 \}$ таке, що для всіх $\mathbf{v} \in K$ справедлива нерівність

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v} - \mathbf{u}) \geq f(\mathbf{v} - \mathbf{u}), \quad (6)$$

де $a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_B \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) E_{ijkl} \varepsilon_{kl}(\mathbf{v}) dX$ є білінійною, а $f(\mathbf{v}) = \int_{\Gamma_c} \mathbf{t} \cdot \mathbf{v} dS$ – лінійною формою.

Еквівалентність варіаційної нерівності (6) контактній задачі у прямій постановці (3)-(5), а також єдиність її розв'язання та еквівалентність задачі мінімізації функціонала $u^* = \arg\{ \min[\Pi(\mathbf{u} \in K) = 1/2 a(\mathbf{u}, \mathbf{u}) - f(u)] \}$ доведена в роботах А.С. Кравчука.

На відміну від традиційних методів оцінки контактних зон і контактного тиску за аналітичною моделлю Герца, у якому для знаходження розмірів контактної площадки досить мати лише значення і напрями головних кривизн поверхонь, у роботі запропоновано використовувати та реалізовано *аналітичний* спосіб обчислення кривизн зв'язаних поверхонь (причому не заданих аналітично).

Альтернативним відносно МСЕ та теорії Герца є МГІР. У роботі реалізований один із його варіантів – МГЕ. Використовуються умови контакту у вигляді (рис.5):

$$\begin{cases} u_{z_1}(x, y) + u_{z_2}(x, y) + h(x, y) = \delta_1 + \delta_2, S_1 \text{ і } S_2 - \text{в контакті;} \\ u_{z_1}(x, y) + u_{z_2}(x, y) + h(x, y) > \delta_1 + \delta_2, S_1 \text{ і } S_2 - \text{поза контактом.} \end{cases} \quad (7)$$

Приймаючи модель пружного напівпростору (рис. 6), можна виразити переміщення виключно через функцію розподілу тиску $p(\xi, \eta)$:

$$\begin{aligned} u_{z_1}(x, y) + u_{z_2}(x, y) &= \left((1 - \nu_1^2) / \pi E_1 + (1 - \nu_2^2) / \pi E_2 \right) \times \\ &\times \iint_S [p(\xi, \eta) / \rho] d\xi d\eta = (\pi E^*)^{-1} \left\{ \iint_S [p(\xi, \eta) / \rho] d\xi d\eta \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Тут $\nu_i, E_i, i = 1, 2$ – пружні параметри кожного з контактуючих тіл.

Для отримання числового розв'язку функція p наближається суперпозицією масиву пірамідальних елементарних розподілів на регулярній сітці з кроком c із рівносторонніх трикутників (рис. 7) і повністю визначається дискретним набором вузлових значень p_n :

$$p(\xi, \eta) \cong \sum_n \hat{p}(\xi - \xi_n, \eta - \eta_n) \cdot p_n. \text{ Для знаходження } p_n \text{ використані:}$$

прямий метод (або колокацій); варіаційний метод (принцип Калькера). При цьому потрібно обчислювати переміщення (8) для використовуваного типу апроксимуючого тиску. У роботі розроблений *аналітичний* шлях обчислення „шаблону” форми розподілу переміщень для одиничного пірамідального елемента

$$w(x, y) = \sum_m \iint_{S^{(1)}} [\hat{p}^{(1)}(\xi, \eta) / \rho] d\xi d\eta, \text{ де } S^{(1)} - \text{шестикутна область з одиничними сторонами; } \hat{p}^{(1)} -$$

одиничний пірамідальний розподіл на ній. Тоді: $u_n = u_{z_1}(I_n) + u_{z_2}(I_n) =$

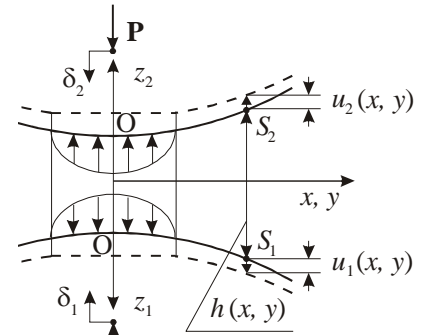


Рис. 5. Деформація тіл у контакті

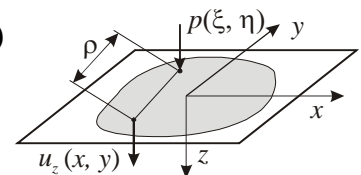


Рис. 6. Переміщення границі напівпростору під дією нормального зусилля

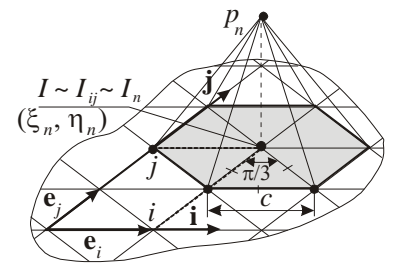


Рис. 7. Регулярна трикутна сітка та пірамідальний елемент функції тиску

$$= u_{z_1}(I_{ij}) + u_{z_2}(I_{ij}) = u_{z_1}(x_{ij}, y_{ij}) + u_{z_2}(x_{ij}, y_{ij}) = (c/\pi E^*) \sum_{kl} w[(x_{ij} - \xi_{kl})/c, (y_{ij} - \eta_{kl})/c] p_{kl} =$$

$$= (c/\pi E^*) \sum_{kl} w(i-k, j-l) p_{kl} = \sum_m C_{nm} p_m, \text{ де } C_{nm} = (c/\pi E^*) w[i(n) - i(m), j(n) - j(m)].$$

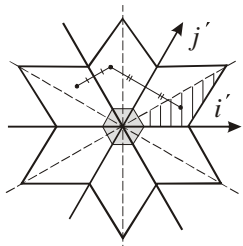


Рис. 8. „Відображення” індексів для обчислення коефіцієнтів шаблону

У дисертації запропоновано використовувати властивості симетрії сітки і елементарних розподілів. Це дозволяє обмежуватися обчисленням значень $w_{ij'}$ лише у вузькому секторі $\{i' \geq 0, 0 \leq j' \leq i'\}$ (рис. 8, заштриховано) та економно зберігати їх при числовій реалізації у вигляді симетричної матриці ($w_{i'j'} = w_{j'i'}$).

У кінцевому підсумку маємо умови контакту (7) у дискретній формі:

$$\begin{cases} \sum_m C_{nm} p_m + h_n - \delta = 0, \text{ вузол } J_n - \text{ в контакті;} \\ \sum_m C_{nm} p_m + h_n - \delta > 0, \text{ вузол } J_n - \text{ поза контактом} \end{cases} \quad (9)$$

та додаткові співвідношення прямого методу – умови додатності і силова:

$$p_m \geq 0, \forall J_m; \quad (\sqrt{3}/2)c^2 \sum_m p_m = P. \quad (10)$$

Розв’язок визначальної системи (9)-(11) знаходиться у ході ітераційної процедури.

Для числового моделювання контактної взаємодії штампу з напівпростором у плоскій постановці (рис. 9) у роботі запропоновано застосувати метод дискретних особливостей до дискретизації сингулярного інтегрального рівняння

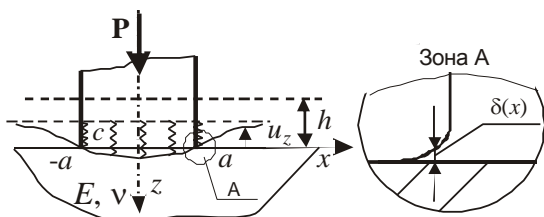


Рис. 9. Схема контактної взаємодії штампу з напівпростором

$$\int_{-a}^a [p(s)/(x-s)] ds = -\pi E u_z'(x)/2(1-\nu^2).$$

У результаті отримана система рівнянь відносно значень контактного тиску, аналогічна (9), але із значно меншою кількістю вузлів дискретизації.

У комплексі всі описані методи складають теоретичну основу для розв’язання зв’язаних задач дослідження НДС тіл з кінематично генерованими поверхнями.

Розділ 3 присвячений числовій реалізації методів автоматизованого генерування геометричних і розрахункових моделей, а також створення спеціалізованого програмно-модельного комплексу (СПМК) (рис. 10).

Основною характерною особливістю КГП є складність їхнього опису прийнятим на даний час в CAD/CAE-системах способом, що відповідає наступним етапам: 1) будується поверхня S_M як дискретний набір точок $M_p, p = 1, \dots, N_M$, що наближають у цих точках ідеальну поверхню S_{id} (припускається похибка ε_M); 2) на побудовану хмару точок натягується деяка поверхня S_{ap} ,

через характер апроксимації якої припускається похибка ε_{ap} у визначенні поточної точки M_{ap} загаль-

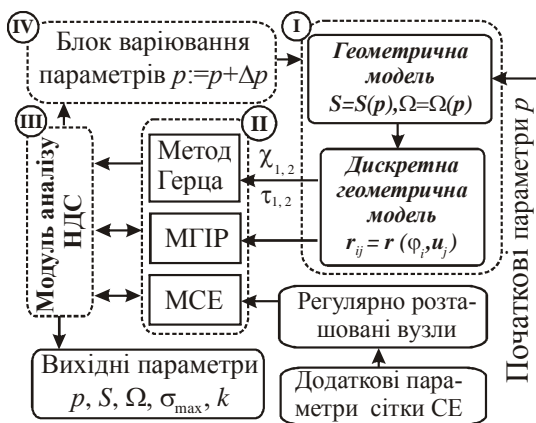


Рис. 10. Структура СПМК для аналізу контактної взаємодії складнопрофільних тіл з КГП та їх геометричного синтезу

ного положення (у тому числі й вузлів СЕ): $|M_{ap} - M_{id}| \leq \varepsilon_{ap}(M_{ap}), M_{ap} \in S_{ap}, M_{id} \in S_{id}$; отримана поверхня S_{ap} розбивається в напів- або автоматичному режимі на СЕ, причому грані останніх (S_G), що виходять всіма своїми вузлами на поверхню S_{ap} , відхиляються в своїх межах від неї на величину ε_e . Відповідно при проходженні цього ланцюжка накопичується похибка наближення точної поверхні (рис. 11) так, що сумарна похибка складає $\varepsilon_{\Sigma} = |\varepsilon_M| + |\varepsilon_{ap}| + |\varepsilon_e|$.

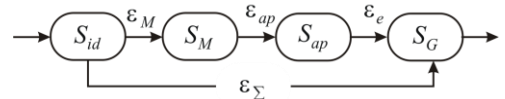


Рис. 11. Похибки моделювання геометрії традиційною технологією

Як альтернатива такому підходу пропонується алгоритм напівавтоматичної генерації топологічно регулярних сіток тіл, обмежених КГП (рис. 12), що передбачає генерування топологічно регулярної сітки вузлів СЕ з використанням властивостей КГП практично з будь-якою наперед заданою точністю на поверхні S_{id} , заданої у цьому випадку в своїх природних координатах; створення множини СЕ, що повністю або в основному складається з шестигранників. У даному випадку можна нехтувати похибкою ε_M , і величина загальної похибки визначається лише ступенем відхилення форми „граневої” поверхні S_G від ідеальної S_{id} . Та хоча і в цьому випадку важко отримати апостеріорну: $\varepsilon_e \approx |IG| = |\mathbf{r}_G(\kappa_1, \kappa_2) - \mathbf{r}_{id}(\kappa_1, \kappa_2)|$, де \mathbf{r}_{id} – радіус-вектор точки I на ідеальній поверхні, а \mathbf{r}_G – на перетині S_G з нормаллю до S_{id} в точці I (рис.13).

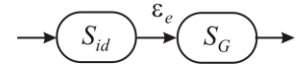


Рис. 12. Запропонована технологія генерування топологічно регулярних сіток

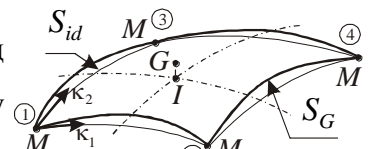


Рис. 13. До оцінки похибки „граневої” поверхні

Для обчислення відхилення ε_e поверхні граней згенерованих СЕ від „ідеальної” поверхні S_{id} використовуються точні значення координат точок цієї поверхні, розташованих усередині грані. У результаті стає принципово можливою побудова набору вузлів, що задають СЕМ, яка апроксимує КГП з наперед заданою точністю. Так, для трилінійних елементів абсолютне значення похибки апроксимації можна оцінити таким чином: $|\zeta_{M_e}| \leq k_{\max} (\Delta\xi^2 + \Delta\eta^2) / 4 \leq k_{\max} s_{\max}^2 / 4$, де k_{\max} – максимальна кривизна,

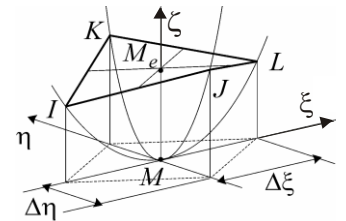


Рис. 14. Оцінка відхилення грані трилінійного елемента від дійсної поверхні

зна, s_{\max} – довжина більшого ребра (рис.14). Зовнішні вузли СЕМ розташовуються на перетині топологічно регулярних координатних ліній в природній параметризації S_{id} . Для визначення і розміщення внутрішніх вузлів сітки вводиться третя координата κ_3 , яка разом з κ_1, κ_2 параметризує весь об’єм тіла (рис. 15).

Вплив форми генерованих СЕ (управління, опис, діагностування, оцінка результуючої похибки) для тіл, обмежених КГП, на точність моделювання НДС було предметом окремого дослідження. У його ході була продемонстрована задовільна точність розв’язання задачі визначення НДС, але при цьому – дуже висока точність позиціонування вузлів СЕ на границі тіл. Це спричиняє точніший опис зазору в спряженні, а, відповідно, і розподілу контактного тиску. Крім того, були розв’язані тестові задачі для обґрунтування вибору параметрів числових моделей.

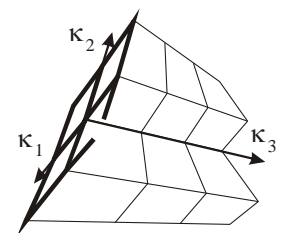


Рис. 15. Побудова внутрішніх вузлів СЕМ

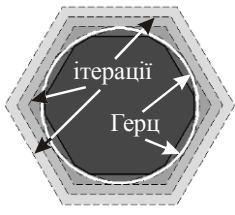


Рис. 16. Ітераційний процес уточнення форми плями контакту для випадку параболічного зазору

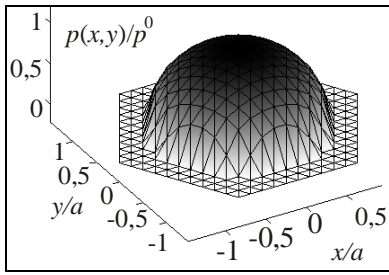


Рис. 17. Кусочно-лінійний розподіл контактної тиску, одержаний у результаті застосування прямого методу

задач аналізу контактної взаємодії і геометричного Вибір об'єктів досліджень при цьому був зумовлений реалізацією заводів, НДІ та КБ, що проектують і виробляють складнопрофільними Конвеєр з КГП. Зокрема, делювання контактної ланцюговими елементами ланцюго-ланковий ланцюг, рис. 18, 19). Була побудована

Рис. 18.

ділянки ланцюга, що піддається поздовжньому розтягуванню. У моделі враховується істотно нелінійний характер процесів: наявність контакту поверхонь пластична поведінка матеріалу, великі деформації. формації ланок ланцюга і дано їх якісне та кількісне лізується складний тривимірний НДС; має місце контактних плям та розподілу контактної тиску, няються від герцевських (чотирипелюсткова форма див. рис. 20); область контакту характеризується локальних напружень і деформацій, що мають при центрацію на внутрішній поверхні ланки ланцюга

такту (рис. 21); перед руйнуванням ланцюг приймає відносно подовження, що приблизно дорівнює половині значення граничної локальної деформації матеріалу, з якого вона виготовлена (рис. 22).

Таким чином, встановлені принципові якісні особливості і кількісні відмінності, що не дозволяють використовувати модель „герцевського” контакту навіть при силлях на силовий привід.

Також було здійснено геометричне та скінелементне моделювання НДС коліс двохпараметричних (ДПП) з урахуванням контактної взаємодії на частинного варіанту циліндро-конічної передачі

Показана висока точність опису НДС при застосуванні призматичних СЕ та МГІР (МГЕ) при невеликій кількості ступеней вільності. Зокрема, було розв'язано за допомогою створеної програми „МГІР” задачу про взаємодію параболоїду обертання з напівпростором. На рис. 16, 17 наведено ілюстрації стягування зони контакту до „герцевської” в ході ітераційного її уточнення, а також відносне (до максимального „герцевського”) значення контактної тиску.

У розділі 4 викладено розв'язання прикладних



синтезу СПТ з КГП. ний реальними потяють машини із розв'язана задача мового приводу (кругдеталізована модель

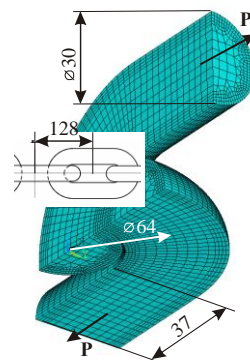


Рис. 19. Круглоланковий ланцюг

складної форми, пружно-Встановлені особливості де не обґрунтування. У них реаскладна конфігурація форми що якісно і кількісно відрізна відміну від еліптичної, неоднорідним розподілом великих навантажень кон- поблизу границі плями кон-

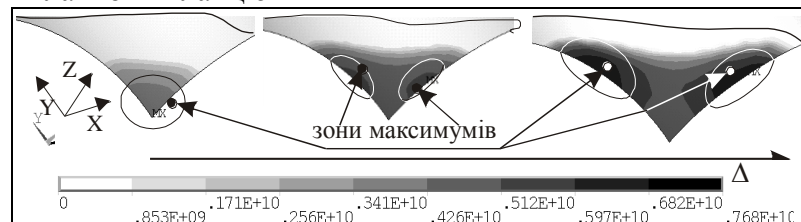


Рис. 20. Характер розподілу контактної тиску з ростом відносного подовження ланцюга Δ (показана четвертина)

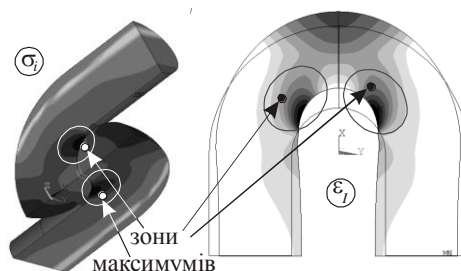


Рис. 21. Напруження за Мізесом та перші головні деформації при подовженні ланки на 15мм

ляють засто- незначних зу- ченно- чних передач прикладі (рис. 23).

Перед проведенням власне СЕ моделювання кожного разу розв'язується задача синтезу геометрії робочих поверхонь зубців ДПП. Це окрема складна нелінійна задача, в якій одночасно зі встановленням найбільш навантажених ділянок робочих поверхонь зубів представляє інтерес вплив геометричних параметрів на характеристики контакту. На рис. 24, наприклад, представлений вид контактних плям у sprzęженні зубів коліс при різних їх положеннях, що якісно узгоджується із загальним характером зміни ступеню витягнутості контактних площадок для всіх передач даного типу. Таким чином, навіть проста герцевська модель контактної взаємодії в межах запропонованого підходу дозволяє одержувати цінні кількісні та якісні результати, що дає можливість здійснити

оцінку міцності зубчастої передачі на етапі синтезу її параметрів. Визначені частки поверхні, які несуть найбільшу контактну навантаженість та надалі можуть бути досліджені додатково іншими методами.

При розробці алгоритму побудови СЕМ проводився аналіз контактної взаємодії зубів передачі в заздалегідь вибраних положеннях коліс. За допомогою геометричної моделі, створеної засобами системи Pro/ENGINEER, була побудована СЕМ в середовищі ANSYS Workbench. Був використаний гексагональний елемент SOLID186, ефективний для тіл з регулярною топологією. Максимальний розмір елементів – 5 мм, в районі точок контакту зубів була створена область зі згущенням, розміри якої разом з розмірами СЕ в цій зоні обиралися виходячи з попередньої оцінки величин довжин напівосей плями контакту згідно з теорією Герца. Одночасно з цим встановлено, що в підповерхневому шарі виникають значні градієнти напружень та деформацій (рис. 25), що викликає необхідність створення зони згущення на глибину, не меншу розмірів контактної плями, в якій розміри елементів не перевищуватимуть 1/10 її розмірів. Вплив локальних особливостей розподілу напружень і деформацій в разі точкового контакту обмежується зоною радіуса 5 ÷ 10 довжин напівосей плями контакту. Також встановлено, що врахування двопарності зачеплення суттєво впливає на величину обчисленого за МСЕ напруження (табл. 1).

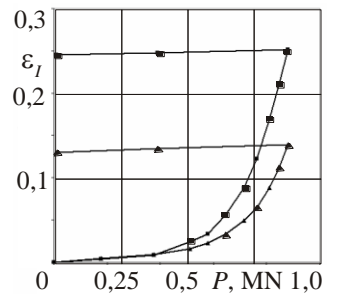
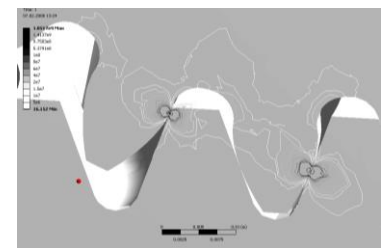
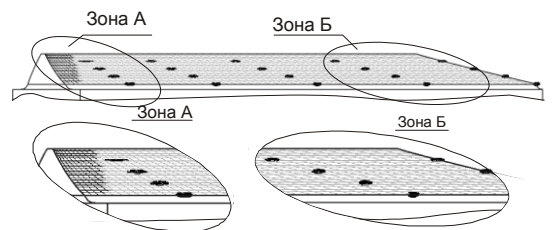
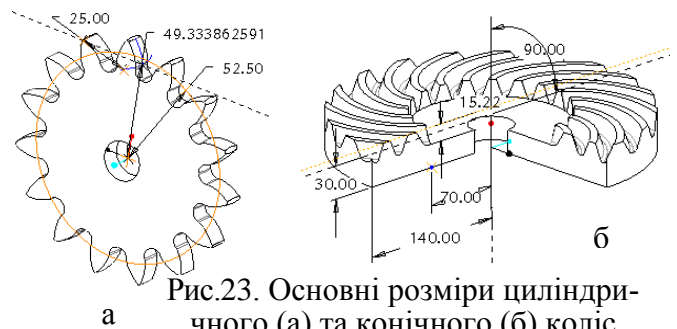


Рис. 22. Залежність максимальних головних деформацій (ϵ_1) та відносного подовження ланцюга ($\Delta l/l$) від величини зусилля розтягання



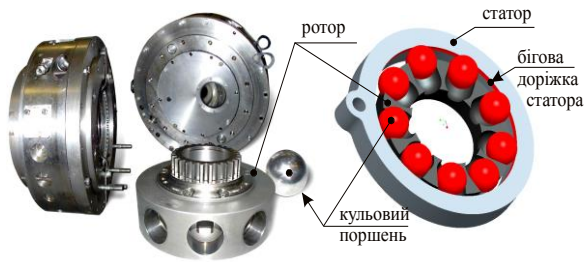


Рис. 26. Радіальна гідропередача ГОП-900 (ХКБМ)

бi поршня передбачається робити близькими для того, щоб зменшити первинний зазор між поршнем i бiговою доріжкою в поперечному напрямi. У результатi форма бiгової доріжки як поверхнi обертання повнiстю визначається параметрами її профiлю: R_t, R_c, θ . При цьому значення конструктивних параметрiв: $R_p=31,75$ мм, $R_{sp}=128$ мм, $R_{st}=159,75$ мм.

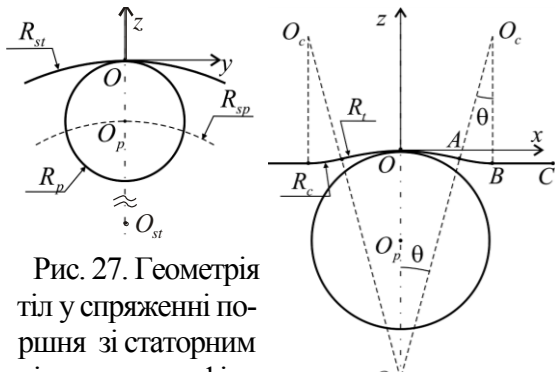


Рис. 27. Геометрія тiл у спряженнi поршня зi статорним

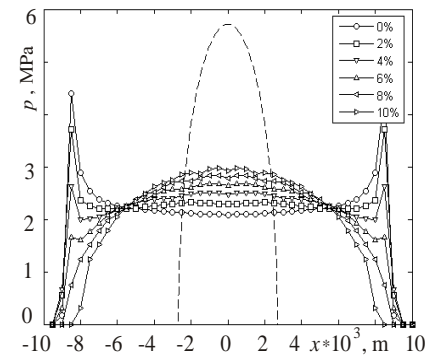


Рис. 28. Розподiл контактнoгo тиску на осi Ox при малих рiзницях радiусiв жолоба та поршня порiвняно з аналогiчним розподiлом у випадку контакту з цилiндром

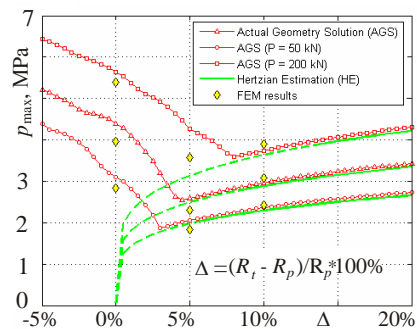


Рис. 30. Залежностi значень максимальнoгo контактнoгo тиску вiд вiдноснoї рiзницi радiусiв жолоба та поршня для трьох рiзних навантажень, отриманi за Герцем, МСЕ и МГЕ

Розв'язана також задача аналізу контактної взаємодії кульового поршня з бiговою доріжкою в радiальнiй ГОП (рис. 26). Розглянуто досить загальний клас профiлiв бiгових доріжок на кiльцi статора (рис. 27). Профiль бiгової доріжки в центральнiй своїй частцi є дугою кола радiуса R_t з кутовою величиною 2θ . Таким чином, середня частка бiгової доріжки є жолобом тороїдальної форми, по якому перекочується поршень при обертаннi ротора.

Радiуси жолоба i поршня передбачається робити близькими для того, щоб зменшити первинний зазор між поршнем i бiговою доріжкою в поперечному напрямi. У результатi форма бiгової доріжки як поверхнi обертання повнiстю визначається параметрами її профiлю: R_t, R_c, θ . При цьому значення конструктивних параметрiв: $R_p=31,75$ мм, $R_{sp}=128$ мм, $R_{st}=159,75$ мм.

Вплив варiйованих параметрiв на характер контактної взаємодії поршня з кiльцем статора за вiдсутностi тертя i локальний НДС демонструється результатами розрахункiв, проведених рiзними методами. Видно (рис. 28, 29), що форма розглянутих поперечних профiлiв зумовлює характер розподiлу контактнoгo тиску, суттєво вiдмiнний вiд герцевського, що необхідно враховувати при виборi значень радiусу центральної частки бiгової доріжки статора ГОП та iнших її конструктивних параметрiв. Рис. 30 демонструє

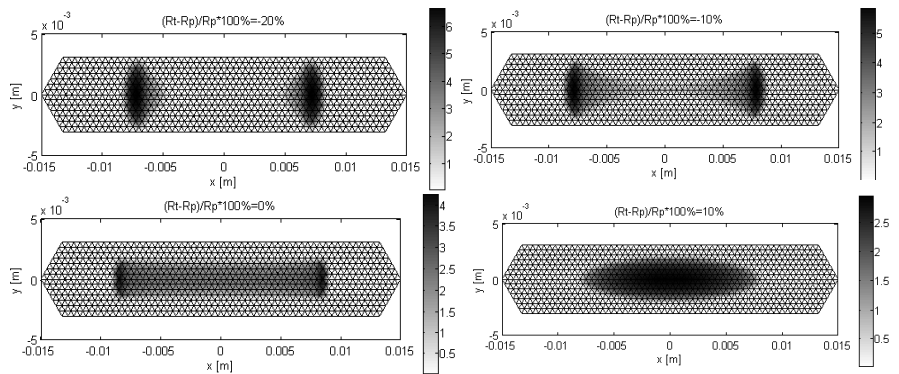


Рис. 29. Розподiли контактнoгo тиску при рiзних значеннях рiзницi радiусiв жолоба i поршня

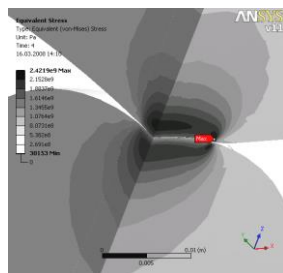


Рис. 31. Розподiл напружень за Мiзесом в кульовому поршнi та статорi при зусиллi стискування 200 кН (МСЕ, четвертина моделi)

областi застосування та порiвняльну точностi результатiв, одержаних за Герцем, МСЕ та МГЕ, а рис. 31 –

Таблиця 1

Контактне зусилля в спряженнi зубiв, Н	Максимальний контактний тиск, ГПа	
	iз СЕМ	згiдно з теорiєю Герца
599.72	1.29	1.24
413.45	2.97	2.65

характер НДС в контактуючих тілах. Дані результати стали основою для визначення раціональної форми бігових доріжок радіальних ГОП з умов контактної міцності.

Одержані в ході розв’язання описаних задач результати підтвердили ефективність, точність та адекватність запропонованих підходів, методів і моделей до дослідження НДС складнопрофільних тіл з КПП.

У розділі 5 описаний комплекс експериментальних досліджень контактної взаємодії СПТ з КПП. Запропонований у роботі алгоритм розв’язання зв’язаних задач реалізований у вигляді СПМК, який задовольняє вимогам наскрізної параметричності та інтегрованості, дає змогу не лише проводити дослідження контактної взаємодії складнопрофільних тіл, але також створювати геометричні моделі, розробляти технологію обробки, і в результаті – виготовляти дослідні зразки (макети виробів), які до теперішнього часу не існували.



Рис. 33. Робочі моменти експериментальних досліджень кульового поршня та статора ГОП

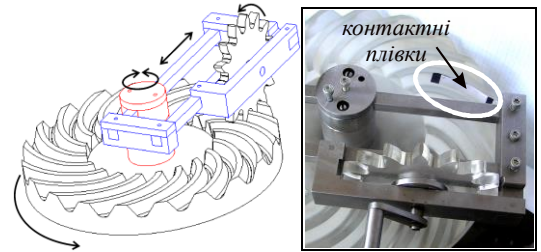


Рис.32. Комп’ютерна, фізична модель зубчастого зачеплення і робочі моменти експериментального дослідження контакту зубців

На прикладі макету циліндро-конічного двохпараметричного зачеплення продемонстрований повний цикл розробки, розрахунків, виготовлення і випробування (рис. 32). Це свідчить про високий ступінь універсальності запропонованого підходу, його працездатності та ефективності.

Для експериментального визначення контак-тних зон і тиску в спряженнях досліджуваних СПТ був використаний метод контактних відбитків, який відрізняється тим, що може бути застосований як на макетних зразках, так і на реальних виробих, як в лабораторних, так і у виробничих умовах, як для низького, так і для високого тиску. Дана технологія була доповнена оригінальним авторським алгоритмом і програм-ними модулями для розпізнавання контактних відбитків та їх розшифровки, що істотно підвищує точність і оперативність проведення досліджень. Проведені комплексні дослідження контактної взаємодії ланок силового ланцюга, ДПП і кульового поршня з біговою доріжкою радіальної ГОП (рис. 33, 34) показали повну якісну від повідність прогнозованої розрахунково та зафіксованої експериментально поведінки контактних зон і тиску при варіюванні місця контакту, зусиль або конструкти-вних параметрів.

Параметри	Притискне зусилля кульового поршня до статора		
	1кН	2кН	5кН
Контактні відбитки			
Картини розшифровки відбитків за допомогою оригінального ПЗ Pressure Mapping Tool, МПа			

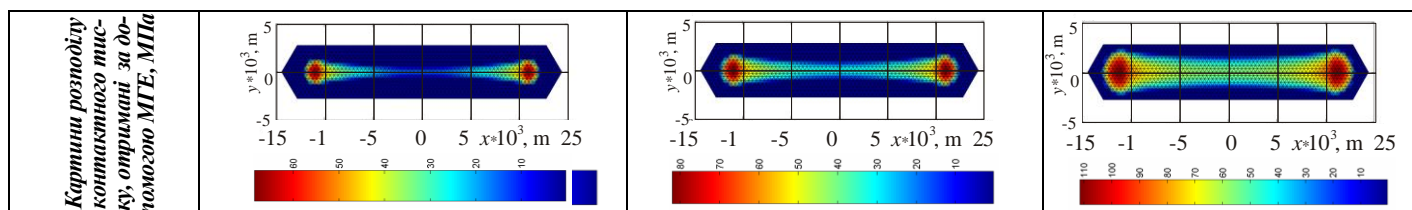


Рис. 34. Результати аналізу контактних відбитків на чутливих плівках Fuji та отриманих МГЕ

Похибка числового моделювання контактної взаємодії досліджуваних СПТ з КГП порівняно з експериментальними даними не перевищує в цілому 11 % (рис. 35, 36). Це свідчить про важливість практичного використання створених спеціалізованих програмно-моделних комплексів у ході науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт при проектуванні та технологічній підготовці виробництва широкого класу нових машин, що містять тіла з кінематично генерованими поверхнями, які перебувають у рухомому контакті.

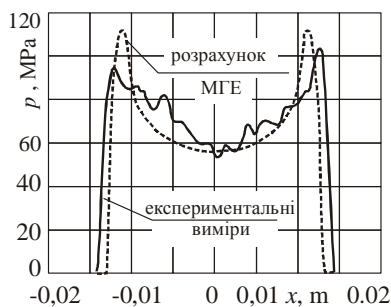


Рис. 35. Розподіли контактного тиску на довгій осі плями контакту при $R_t = 31,0$ мм, $P = 5$ кН

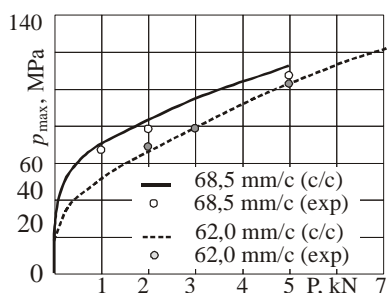


Рис. 36. Співставлення числових (с) та експериментальних (exp) залежностей максимального контактного тиску від величини притискового зусилля для макетів доріжок з радіусами жолобів 31,0 мм і 34,25 мм

Комплекс рекомендацій, одержаних з використанням створених у ході виконання дисертаційних досліджень моделей, був покладений в основу при проектуванні, призначенні технологічних режимів виготовлення і умов експлуатації силових ланцюгових приводів, двохпараметричних передач та радіальних гідропередач у ВАТ „Азовмаш”, Головному спеціалізованому конструкторсько-технологічному інституті, ХКБМ та ХБРЗ. Виготовлені на їх основі макети і реальні машини продемонстрували працездатність і задану навантажувальну здатність. У результаті продемонстрована адекватність запропонованих методів, достовірність і точність побудованих моделей та одержаних результатів досліджень складнопрофільних тіл з кінематично генерованими поверхнями.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлена та розв'язана науково-практична задача вдосконалення методів аналізу НДС складнопрофільних тіл (СПТ) з урахуванням контактної взаємодії, а також геометричного синтезу їх кінематично генерованих поверхонь. При цьому отримані наступні наукові результати.

1. На основі аналізу стану питання зроблено висновки про недостатні можливості існуючих методів визначення НДС елементів машинобудівних конструкцій з урахуванням контактної взаємодії по кінематично генерованих поверхнях (КГП). Удосконалення цих методів було обране як задача дисертаційних досліджень.

2. У роботі запропонований перспективний підхід до розв'язання зв'язаної задачі дослідження НДС з урахуванням контактної взаємодії складнопрофільних тіл і синтезу КГП, що базується, на відміну від традиційного підходу, на єдиному описі математичної, геометричної і числової моделей. Обґрунтовано використання не одного, а комплексу методів і моделей різного рівня складності: метод Герца, метод граничних інтегральних рівнянь (МГІР) і метод скінченних елементів (МСЕ) в єдиному пакеті. Показано, що метод Герца застосовний для оціночних розрахунків у строго визначеному діапазоні, а МГІР дає прийнятну точність в ширшому діапазоні; еталонним же за точністю є МСЕ. Досліджено контакт тіл, форма яких може бути задалегідь не визначена, як у традиційному випадку, а встановлюється у ході

розв'язання спеціальної задачі їх геометричного синтезу за умовами кінематичного спряження у вигляді хмари зв'язаних точок. Запропоновано використовувати властивості умов кінематичного спряження тіл для побудови розрахункових моделей їх контактної взаємодії: точні значення тензора кривизни контактуючих поверхонь в точці; уточнені значення функції зазору у вузлових точках; точні просторові координати вузлових точок СЕ. Розвинено МГР у частині більш точного визначення коефіцієнтів матриці та правих частин системи визначальних рівнянь.

3. Розроблена у роботі комплексна математична модель НДС тіл з КГП реалізована у вигляді спеціалізованих програмно-модельних комплексів (СПМК), що інтегруються у процес проектних досліджень. Запропонований перспективний метод генерування скінченно-елементного розбиття на основі використання топологічно регулярних поверхневих криволінійних сіток на кінематично генерованих поверхнях.

4. Із застосуванням СПМК розв'язано цикл прикладних задач моделювання НДС із урахуванням контактної взаємодії складнопрофільних тіл. Установлено закономірності розподілу контактного тиску та контактних зон у спряженні цих тіл. Вони у багатьох випадках різко відмінні від традиційних герцевських розподілів.

5. Експериментальні дослідження НДС і контактної взаємодії СПТ проводилися на спеціально розроблених стендах і дослідних зразках. Так, при експериментальному визначенні методом контактних відбитків контактних зон і контактного тиску у спряженні елементів макету силового ланцюга, в прототипі циліндро-конічної передачі, а також при дослідженні взаємодії кульового поршня з макетом бігової доріжки гідропередачі підтверджені якісні та кількісні ефекти зміни розподілу контактних зон і тиску при варіюванні геометричної форми спряжених поверхонь (відмінність від числових результатів не перевищує 11-16 %). 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 дисертаційних досліджень упроваджені в ході виконання ряду господарських договорів і договорів про співпрацю з ХБРЗ та ВАТ „Азовмаш”, а також бюджетних тем в НТУ „ХПІ”. Запропоновані в дисертації теоретичні розробки, алгоритми і моделі рекомендуються для використання при дослідженні широкого класу складнопрофільних тіл з кінематично генерованими поверхнями, які є об'єктами досліджень в різних галузях машинобудування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ткачук Н.Н. Математическое моделирование динамических процессов и напряженно-деформированного состояния элементов гидрообъемной передачи / А.В. Ткачук, Н.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2003. – № 28. – С. 9-18.

Здобувачем запропонована методика математичного моделювання динамічних процесів та напружено-деформованого стану елементів гідрооб'ємних передач.

2. Ткачук Н.Н. Методы и алгоритмы синтеза формы рабочих поверхностей зубьев двухпараметрических передач / Н.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2005. – № 60. – С.137-151.

3. Ткачук М. Напружено-деформований стан просторових конструкцій: методи автоматизованого аналізу / А. Васильєв, М. Ткачук, В. Головченко // Машинознавство. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2006. – №1(103). – С.23-28.

Здобувачем пропонується підхід, що дозволяє аналізувати складну поведінку просторових конструкцій при зміні певних параметрів із розширеної їх множини (числа, тип навантаження, тити СЕМ тощо).

4. Ткачук Н.Н. Особенности реализации кинематического метода расчета двухпараметрических передач / Н.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2006. – № 3. – С.133-151.

5. Ткачук Н.Н. Оценка контактных напряжений в сопряжении сложнопрофильных деталей / Н.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2006. – № 24. – С.137-151.

6. Ткачук Н.Н. Топологически регулярные конечно–элементные сетки для тел с кинематически генерируемыми поверхностями / Н.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2006. – № 32. – С.156-166.

7. Ткачук Н.Н. Особенности построения дискретных моделей тел с кинематически генерируемыми поверхностями / Н.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2006. – № 33. – С.133-152.

8. Ткачук Н.Н. Конечно–элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н. и [др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2006. – № 1. – С.57-79.

Здобувачем запропоновано структуру спеціалізованих інтегрованих систем автоматизованого проектування та дослідження НДС на прикладі елементів двохпараметричних передач.

9. Ткачук Н.Н. Контактное взаимодействие сложнопрофильных деталей с кинематически генерируемыми поверхностями / Н.Н. Ткачук, М.М. Пеклич, А.Н. Ткачук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганск: Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2007. – Вып.9 (115). – С.217-223.

Здобувачем розроблено методи синтезу та аналізу деталей механізмів з поверхнями, що генеруються кінематично, на прикладі ланок, що перебувають у рухомому контакті.

10. Ткачук М.М. Віртуальне прототипування механізмів з кінематично генерованими поверхнями / М.М. Ткачук // Машинознавство. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2007. – №6 (109). – С.26-32.

11. Ткачук Н.Н. К вопросу о тестовых задачах для кругового цилиндра / Н.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2007. – № 38. – С.151-158.

12. Ткачук Н.Н. К вопросу конечноэлементного моделирования колес двухпараметрических передач / Н.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2008. – № 2. – С.159-166.

13. Ткачук Н.Н. Моделирование контактного взаимодействия элементов силовых цепей / Ткачук Н.Н., Ткачук Н.А. // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2008. – № 14. – С. 142-152.

Здобувачем обґрунтовано застосування методик аналізу НДС деталей з КГП для розрахунку ланок силових ланцюгів. Побудовано деталізовану модель сегмента ланцюга шахтових конвеєрів.

14. Ткачук Н.Н. Реализация полного цикла исследований деталей со сложнопрофильными поверхностями на примере двухпараметрических передач / Н.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2008. – № 29. – С.44-50.

15. Ткачук Н.Н. Экспериментальное исследование контактного взаимодействия сложнопрофильных тел / Н.Н. Ткачук // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2008. – № 1. – С. 79-93.

16. Ткачук Н.Н. Анализ контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: вариант реализации метода граничных интегральных уравнений / Г.И. Львов, Н.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2008. – № 42. – С.81-95.

Здобувачем для дослідження контактної взаємодії складнопрофільних тіл пропонується застосувати метод граничних інтегральних рівнянь. Особливістю запропонованої реалізації методу є аналітичний спосіб обчислювання елементів матриці коефіцієнтів впливу для підобластей трикутної форми. Визначення області контакту та розподілу контактної тиску здійснюється методом ітерацій.

17. Полищук Т.В. Комплексные экспериментальные исследования макета механизма наклона технологической машины / Т.В. Полищук, Н.Н. Ткачук // *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ „ХПР”, 2009. – №1. – С.26–33.

Здобувачем розроблено методика розшифровки результатів експериментальних досліджень складнопрофільних тіл із застосуванням технології чутливих до тиску контактних плівок.

18. Ткачук Н.Н. Кинематический метод и его реализация в приложении геометрического синтеза зубчатых передач / Н.Н. Ткачук, Н.А. Ткачук // *Вісник НТУ „ХПР”*. – Харків: НТУ „ХПР”, 2010. – № 27. – С.182–197.

Здобувачем запропонована математична модель для розв’язання задачі синтезу робочих поверхонь зубів двоохпараметричних передач на прикладі циліндро-конічної передачі. Адаптовано та реалізовано алгоритм синтезу робочих поверхонь зубів кінематичним методом Литвина.

19. Ткачук Н.Н. К вопросу о контактном взаимодействии плоского штампа с полупространством / Н.Н. Ткачук, А.Н. Ткачук // *Східно-європейський журнал передових технологій*. – Харків: УДАЗТ, 2010. – № 3/9 (45). – С. 50–53.

Здобувачем поставлена та розв’язана методом дискретних особливостей зведена до інтегрального рівняння задача про взаємодію штампа с пружним напівпростором. Проведено параметричний аналіз моделі зі скінченною контактною жорсткістю та радіусом скруглення краю штампа.

20. Ткачук М. Синтез геометрії й аналіз напружено-деформованого стану складнопрофільних деталей, що перебувають у рухомому контакті / М. Пеклич, М. Ткачук // *Тез. доп. 8-му Міжн. симпозиумі укр. інж.-механіків*. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2007 р. – С.88–89.

Здобувачем досліджується питання створення керованих геометричних і скінченно-елементних моделей тіл з поверхнями складної форми. Вивчені можливості їх застосування в єдиному циклі синтезу геометрії складнопрофільних тіл та аналізу їх напружено-деформованого стану.

21. Ткачук М.М. Контактна взаємодія складнопрофільних деталей з поверхнями, що кінематично генеруються / М.М. Ткачук, М.М. Пеклич, Г.В. Ткачук // *Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій: Тез. доп. міжн. наук.-техн. конф. пам’яті ак. В.І.Моссаковського*. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2007. – С. 80-82.

Здобувачем запропоновано технологію побудови топологічно регулярних СЕМ тіл зі складною геометрією. Вона дозволяє отримувати параметризовані скінченно-елементні моделі в рамках процедури синтезу геометрії досліджуваних об’єктів і може бути реалізована у САЕ-комплексах.

22. Ткачук М.М. Елементи трансмісій бойових машин: аналіз фізико-механічних процесів та синтез параметрів / О.В. Мартиненко, М.М. Ткачук, О.В. Устиненко [та ін.] // *Перспективи розвитку озброєння і військової техніки в Збройних Силах України: зб. тез. доп. Першої Всеукр. наук.-практ. конф., 4-5 березня 2008 р.* – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2008. – С.104.

Здобувачем обґрунтована актуальність і важливість досліджень елементів трансмісії та розглянуто питання скінченно-елементного їх моделювання.

23. Ткачук М.М. Моделювання контактної взаємодії складнопрофільних тіл: методи, моделі, алгоритми / М.М. Ткачук, І.Б. Артьомов, А.М. Ткачук / *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: тези 1-й міжн. наук.-техн. конф.* – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2008. – С.198-199.

Здобувачем розроблено методи синтезу та аналізу деталей з КПП.

24. Ткачук Н.Н. Об особенностях расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния сложнопрофильных тел / Н.А. Ткачук, Н.Н. Ткачук, Т.В. Полищук // *Динаміка, надійність і довговічність механічних і біомеханічних систем та елементів їхніх конструкцій: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 8-11 вересня 2009 р.* – Севастополь: СевНТУ, 2009. – С.178-182.

Здобувачем пропонуються методи і засоби експериментального дослідження напружено-

деформованого стану при контактній взаємодії дослідних зразків складнопрофільних деталей.

АНОТАЦІЇ

Ткачук М.М. Аналіз контактної взаємодії складнопрофільних елементів машинобудівних конструкцій з кінематично спряженими поверхнями. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2011.

У роботі розв’язана задача аналізу напружено-деформованого стану (НДС) складнопрофільних елементів машинобудівних конструкцій з урахуванням контактної взаємодії по поверхнях, геометрична форма яких описується кінематичними умовами спряження. Це зумовило особливості розв’язання задачі визначення НДС цих тіл при їх контактній взаємодії. Запропоновано для аналізу контактної взаємодії цих тіл застосувати різнорівневі за точністю та трудомісткістю моделі: модель Герца; метод граничних інтегральних рівнянь (МГІР) та метод скінченних елементів (МСЕ). Для більш ефективного застосування цих методів розроблено способи точного визначення кривизни поверхонь цих тіл у точках взаємодії, зазору між ними та координат точок цих поверхонь. У роботі запропоновано напіваналітичний метод для визначення контактних зон та розподілу контактного тиску, а також аналітичні співвідношення для обчислення елементів матриці впливу у визначальній системі рівнянь МГІР. МСЕ при аналізі НДС досліджуваних у роботі тіл доповнюється новим алгоритмом побудови топологічно регулярних скінченно-елементних сіток. Запропоновані моделі і алгоритми реалізовані у спеціалізованих програмно-модельних комплексах, розв’язано низку прикладних задач визначення НДС елементів силових ланцюгів, кульових поршнів гідропередач, зубчастих коліс двохпараметричного зачеплення. Отримані результати були перевірені у ході експериментальних досліджень із залученням чутливих до тиску плівок. Для комп’ютерної розшифровки картин контактних відбитків створено спеціальну програму. Установлено задовільну відповідність результатів числових та експериментальних досліджень.

Ключові слова: прикладна теорія пружності, міцність машин, напружено-деформований стан, контактна взаємодія, складнопрофільне тіло, кінематично генерована поверхня, метод граничних інтегральних рівнянь, метод скінченних елементів

Ткачук Н.Н. Анализ контактного взаимодействия сложнопрофильных элементов машиностроительных конструкций с кинематически сопряженными поверхностями. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. Национальный технический университет „Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2011.

В работе решена задача анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) сложнопрофильных элементов машиностроительных конструкций с учетом контактного взаимодействия по поверхностям, геометрическая форма которых описывается кинематическими условиями сопряжения. Таким обра-

зом, возникает связанная задача анализа НДС и геометрического синтеза поверхностей контактирующих тел.

Особенностью описания геометрической формы контактирующих поверхностей является невозможность (в общем случае) аналитического их описания. Они получаются в виде двух облаков попарно сопряженных точек, которые находятся в ходе решения нелинейной задачи кинематического сопряжения. Именно это обстоятельство и обусловило особенности решения задачи определения напряженно-деформированного состояния этих тел при их контактном взаимодействии.

В работе предложено для анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных гладких тел с кинематически генерируемыми поверхностями (КГП) применить разноуровневые по точности и трудоемкости модели: модель Герца; метод граничных интегральных уравнений (МГИР) и метод конечных элементов (МКЭ). Данные методы и модели на их основе объединены на основе единого описания кинематически генерируемых поверхностей.

При этом для более эффективного применения этих методов разработаны способы точного определения кривизны поверхностей этих тел в точках взаимодействия, точного зазора между ними и точного определения координат точек этих поверхностей. Это дает возможность значительно повысить точность всех трех привлеченных методов, особенно для определения контактных зон и распределения контактного давления.

Получил дальнейшее развитие метод граничных интегральных уравнений для случая контакта двух полубесконечных тел. Предложен полуаналитический метод для определения контактных зон и распределения контактного давления. Кроме аналитического определения функции зазора между исследуемыми телами, предложены также аналитические соотношения для получения элементов матрицы влияния в определяющей системе уравнений МГИР, для решения которой используется метод итераций. Кроме того, предложено использовать свойства симметрии и регулярности сетки дискретизации для экономного вычисления и хранения элементов матрицы влияния.

МКЭ при анализе напряженно-деформированного состояния исследуемых в работе тел дополняется, кроме специально разработанной процедуры точного определения положения узлов конечно-элементной сетки на кинематически сопряженных поверхностях, еще и новым алгоритмом построения топологически регулярных конечно-элементных сеток с использованием сеток, построенных во внутренних криволинейных координатах этих поверхностей. Это дает возможность повысить качество создаваемых конечно-элементных моделей, во-первых, за счет более точного расположения граничных узлов конечных элементов на кинематически генерируемых поверхностях, а, во-вторых, за счет построения конечных элементов с более высокими аппроксимационными свойствами (шестигранные призмы вместо тетраэдров).

Предложенные в работе модели и алгоритмы реализованы в специализированных программно-модельных комплексах, которые совмещают специальные программные модули для синтеза геометрической формы поверхностей исследуемых тел, спецмодули анализа контактного взаимодействия по Герцу и МГИР, а также модули редактирования конечно-элементных моделей этих тел.

С использованием разработанных специализированных программно-модельных комплексов решен ряд прикладных задач определения напряженно-деформированного состояния элементов силовых круглозвенных горных цепей, шаровых поршней гидропередат, зубчатых колес двухпараметрического зацепления.

Полученные результаты были проверены в ходе экспериментальных исследований на специально собранных стендах, в т.ч. с привлечением технологии контактных отпечатков с использованием чувстви-

тельных к давлению пленок.

Для экспериментальных исследований с использованием программно-модельного обеспечения, созданного в ходе диссертационных разработок, были спроектированы, верифицированы и изготовлены опытные образцы сложнопрофильных деталей. Для компьютерной расшивки картин контактных отпечатков создан специальный алгоритм и программа. Установлено удовлетворительное количественное и качественное соответствие результатов, полученных в ходе числовых и экспериментальных исследований.

Разработанные методы, модели, алгоритмы и специализированные программно-модельные комплексы внедрены в практику научных исследований, проектных и технологических работ в НТУ „ХПИ”, ОАО „Азовмаш” и ОАО „Головной специализированный конструкторско-технологический институт” (г. Мариуполь), на Государственном предприятии „Харьковский бронетанковый ремонтный завод”. Получены акты внедрения.

Ключевые слова: прикладная теория упругости, прочность машин, напряженно-деформированное состояние, контактное взаимодействие, сложнопрофильное тело, кинематически генерируемая поверхность, метод граничных интегральных уравнений, метод конечных элементов

Tkachuk M. Analysis of contact interaction of machine-building constructions complex shaped elements with cinematically conjugate surfaces. – Manuscript.

Candidate’s thesis in engineering science, specialization 05.02.09 – dynamics and strength of machines. National Technical University „Kharkiv Polytechnical Institute”, Kharkiv, 2011.

In the present work a solution to a problem of stress-strain analysis of engineering structures elements of geometrical form determined by kinematical coupling criteria is given. The key focus of the work is contact interaction of machine parts over the working surfaces obtained in the form of a cloud of pairwise conjugate points derived via solving a system of non-linear equations. Several numerical methods are chosen for the solution of the arising contact problems, namely Hertzian model of pointwise contact, method of boundary integral equations (MBIE) and the finite element method (FEM). These methods being applied to the bodies with kinematically generated surfaces (KGS) require precise evaluation of the gap between such surfaces as well as their curvatures, for which exact algorithms were developed. A further development to the MBIE is delivered in this work. Besides analytical computation of gap function for the considered interface couplings, an efficient and though simple algorithm for the computation and composition of the influence matrix for the resolving system of equations is offered in the work. The finite element technique is supplemented in this work by a new algorithm of generation of regular meshes for bodies with KGS. The proposed methods and algorithms were implemented in the form of special-purpose „software-and-model” complexes. With their use a broad set of engineering problems arising in design of haul chains, hydrostatic drives and two-parameter gear transmissions were solved. The obtained results were verified in the course of experimental studies by means of contact prints technique. The comparative analysis displayed good qualitative and quantitative agreement of previously obtained numerical results and the measured contact stress distributions.

Keywords: applied theory of elasticity, strength of machines, stress-strain state, contact interaction,

complex shaped bodies, kinematically generated surface, method of boundary integral equations, the finite element method

Ткачук Микола Миколайович

**АНАЛІЗ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ
З КІНЕМАТИЧНО СПРЯЖЕНИМИ ПОВЕРХНЯМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск:
доц., к.т.н, Трубаєв О.І.

Підп. до друку 14.01.2011 р. Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк - різнографічний. Ум. друк. арк. 0,9. Гарнітура Таймс.
Наклад 100 прим. Замовлення №058398

Надруковано у СПД ФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16.
