

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Лавінський Володимир Іванович

УДК 539.3

**МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ І ЖОРСТКІСТЬ  
СТРУКТУРНО ЗВ'ЯЗАНИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ  
ПРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ І КОНТАКТНОМУ НАВАНТАЖЕННЯХ**

Спеціальність 05.02.09 - Динаміка та міцність машин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків - 2001

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор,  
**Морачковський Олег Костянтинович,**  
 Національний технічний університет  
 "Харківський політехнічний інститут"  
 завідувач кафедри теоретичної механіки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, с.н.с.,  
**Зіньковський Анатолій Павлович,**  
 Інститут проблем міцності НАН України, м. Київ,  
 завідувач відділу коливань в роторних системах;

доктор технічних наук, доцент,  
**Жовдак Валерій Олексійович,**  
 Національний технічний університет  
 "Харківський політехнічний інститут"  
 Міністерства освіти і науки України, м. Харків,  
 професор кафедри динаміки і міцності машин;

доктор технічних наук,  
**Шаблій В'ячеслав Петрович,**  
 Кременчуцький державний політехнічний університет,  
 Міністерства освіти і науки України, м. Кременчук,  
 завідувач кафедри вищої математики.

**Провідна установа:** Інститут проблем машинобудування  
 ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків.

Захист відбудеться 20.02.2002 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої ради Д  
 64.050.10 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний ін-  
 ститут" за адресою:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного уні-  
 верситету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий 10.01.2002р.

Вчений секретар  
 спеціалізованої вченої ради

Бортовой В.В.

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Важливе місце при проектуванні і створенні машин нового покоління на базі прогресивних технологій займають розрахунки на міцність і жорсткість об'єктів нової техніки. Для адекватного моделювання складних конструкцій та умов експлуатації нової техніки їхні розрахункові схеми потребують уточнених, у порівнянні з традиційними, математичних моделей, які відповідають структурно зв'язаним механічним системам та враховують взаємодію елементів різної мірності - об'ємних, плоских і стержневих елементів, що мають багатокомпонентні структури та складні форми. Для цих об'єктів характерним є те, що деформування конструктивних елементів відбувається за умов контактної взаємодії та дії полів різної фізичної природи.

Актуальність теми визначається великим попитом у створенні нової техніки, яка узагальнена в роботі у клас структурно зв'язаних механічних (СЗМ) систем, та зацікавленістю багатьох наукових шкіл у створенні ефективних методів розрахунків на міцність і жорсткість таких систем, які були б спроможні враховувати складні процеси їхнього деформування при контактному, тепловому й електромагнітному навантаженні.

Тема роботи має важливу цінність у зв'язку з реалізацією міжнародних проектів і розробок по створенню принципово нових електрофізичних установок - прообразів нових джерел енергії на базі керованої термоядерної реакції. Пріоритетність теми дисертації та її практична цінність пов'язана із створенням і впровадженням на підприємствах України нових видів багато-параметричних зубчастих передач із дрібно-дискретною зміною передатного відношення для транспортних засобів і прогресивних технологій, заснованих на енергії імпульсних магнітних полів.

Разом з цим, в галузі динаміки та міцності машин значний науковий і практичний інтерес становлять розробки у напрямку створення нових ефективних методів розв'язання контактних задач нелінійно деформуємих тіл складної форми у тривимірній постановці з урахуванням різних механізмів їхньої взаємодії, тертя в зонах контакту, попередніх натягів і зазорів при дії інтенсивного силового навантаження, теплових та електромагнітних полів. До теперішнього часу ця проблема не має завершеного вирішення. Наявні окремі розробки у цьому напрямку не задовольняють у повній мірі потреби сучасної інженерної практики.

Таким чином, розробка науково обгрунтованих методів розрахунків на міцність і жорсткість неоднорідних структурно зв'язаних механічних систем, які складаються із елементів різної мірності та деформуються при тепловому, електромагнітному і контактному навантаженнях, є актуальною та має важливе наукове і практичне значення для проектування нової техніки і оснащення прогресивних технологій.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Обраний напрямок досліджень збігається з держбюджетними науково-дослідними роботами, що виконані в НТУ "ХПІ" за координаційним планом міжвузівської програми Міністерства освіти і науки України "Створення теорії, методів математичного моделювання та чисельного аналізу процесів деформування твердих тіл та складних механічних систем", за темами: "Розробка методів чисельного аналізу міцності, стійкості і коливань елементів конструкцій космічних платформ в умовах інтенсивних термосилових впливів" (1991-1996р.р, № ДР

0194U012949), "Розробка наукових основ розрахунку та оптимізації систем, що пристосовуються до умов навантаження або навколишнього середовища, що змінюється" (1997-1999р.р., № ДР 0197U001905).

Дослідження контактної взаємодії об'ємних структурно зв'язаних механічних систем одержані при виконанні в ІМІС НАНУ держбюджетної теми Міністерства ВПК і конверсії України: "Розробка системи аналізу працездатності, довговічності і матеріалоемності машинобудівних конструкцій з урахуванням контактної взаємодії їх елементів" (1995-1996 р.р., № ДР 0194U019622).

Дослідження електромагнітних систем токамаків та торсатронів одержано в сумісних із ННЦ "ХФТІ" науково-дослідних роботах в рамках цільової комплексної термоядерної програмі колишнього СРСР (Постанова Президії АН УРСР і Колегії Мінвузу УРСР, №96 від 2 березня 1979 р.) за темами: "Дослідження напружено-деформованого стану електромагнітної системи, вакуумної камери і першої стінки токамака ТБ-0" (1979-1980 р.р., № ДР 79063907), "Дослідження напружено-деформованого стану основних вузлів магнітних систем торсатронів" (1983-1985 р.р., № держ. реєстрації 0184.0054108).

Методики створення нових технологій магнітно-імпульсного штампування використано при виконанні в НТУ "ХПІ" держбюджетної науково-дослідної роботи Міністерства освіти і науки України за координаційним планом "Високоефективні технологічні процеси в машинобудуванні" за темою "Розробка методики розрахунку та дослідження напружено-деформованого стану обладнання для магнітно-імпульсного штампування тонких металів" (1999-2002р.р., № ДР 0100U001677), керівником якої є автор.

**Мета і задачі дослідження. Метою роботи** є розробка, теоретичне та експериментальне обґрунтування методів розрахунку на міцність і жорсткість неоднорідних багатоконтактних СЗМ систем при тепловому, контактному й електромагнітному навантаженнях для проектування нової техніки і прогресивних технологій.

Для реалізації цієї мети в роботі розв'язані наступні **задачі**:

1. Створено узагальнені математичні моделі нелінійного деформування СЗМ систем в умовах дії електромагнітних та теплових полів, з урахуванням різних механізмів контактної взаємодії між їхніми елементами.

2. Надані математичні постановки мішаних контактних задач для СЗМ систем з урахуванням фізично-нелінійного та конструктивно нелінійного деформування їхніх елементів при контактному, тепловому й електромагнітному навантаженнях.

3. Розроблені методи й алгоритми розрахунку на міцність і жорсткість СЗМ систем, в основу яких покладено відмінні від традиційних схеми застосування МСЕ і методу ортогональної прогонки при розв'язанні сформульованих крайових задач, відповідних розглянутому класу технічних систем, які реалізовані у створеному в роботі програмному комплексі SPACE-T.

4. Досліджена вірогідність розроблених методів розрахунку і програмного комплексу шляхом розв'язання на цій основі плоских та просторових контактних задач та

порівнянням отриманих даних із відомими в літературі аналітичними, числовими й експериментальними даними.

5. Визначено якісні та кількісні закономірності властивостей міцності і жорсткості для СЗМ систем із багатокомпонентними неоднорідними елементами при контактному й електромагнітному навантаженнях.

6. Розроблені та теоретично й експериментально обґрунтовані методики оцінки міцності і жорсткості складних об'єктів нової техніки на етапах їхнього проектування, створення та впровадження.

7. Реалізовано нові конструкторські та технологічні проекти для впровадження в обробляючу промисловість України прогресивних технологій із використанням енергії магнітних полів.

**Об'єктом дослідження** є механічні і технологічні структурно зв'язані системи, що відповідають зубчастим двох-параметричним передачам з дрібно-дискретним змінюванням швидкості, бандажним складеним матрицям для видавлювання, електромагнітним системам токамаків і торсатронів, індукторним системам для магнітно-імпульсного штампування.

**Предметом дослідження** є конструктивна міцність і жорсткість СЗМ систем при електромагнітних і контактних навантаженнях, які відповідають розрахунковим схемам об'єктів досліджень.

**Методи дослідження**, які прийняті в роботі, складають комплекс обчислювальних методів теорії пружності і пластичності на базі метода скінченних елементів, методи математичного моделювання полів навантаження і напружено - деформованого стану, методи тензометрії, статистичні методи обробки числових і експериментальних даних.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

- Уперше на єдиній науково-методологічній основі, яка базується на загальних принципах механіки і обчислювальних методах для розв'язання нелінійних крайових задач, створені ефективні методи аналізу міцності і жорсткості структурно зв'язаних механічних систем різної мірності при контактному й електромагнітному навантаженнях, що дозволило вирішити комплекс складних проблем проектування нової енергетичної і транспортної техніки, створення прогресивної технології магнітно-імпульсного штампування.

- Створені нові математичні моделі і розрахункові схеми СЗМ систем, які адекватно описують конструктивні і технічні особливості складних об'єктів нової техніки, відповідно до просторових і плоских зубчастих варіаторів швидкості, бандажних складених матриць для видавлювання, електромагнітним системам (ЕМС) токамаків і торсатронів, індукторних систем для магнітно-імпульсного штампування, та відрізняються від існуючих тим, що мають можливість уточненого врахування складних механізмів деформування таких систем при електромагнітному і контактному навантаженнях.

- Встановлено нові якісні та кількісні закономірності властивостей міцності і жорсткості багатокомпонентних структурно зв'язаних механічних систем різної мірності при лінійному, нелінійно-пружному і конструктивно-нелінійному деформуваннях в умовах

контактного й електромагнітного навантажень на базі просторових скінчено-елементних моделей.

- Уперше, на підставі сумісного аналізу електромагнітних і механічних процесів в технологічних системах "індуктор - заготовка - матриця", сформульовано та теоретично й експериментально обґрунтовано необхідні технологічні й конструктивні умови для ефективного здійснення магнітно-імпульсного штампування тонколистових металевих заготовок.

**Обґрунтованість, вірогідність наукових положень,** висновків і рекомендацій підтверджено в роботі дослідженнями із внутрішньої збіжності числових розв'язків за варіюванням ступеня дискретизації просторових областей конструкцій, задовільним збігом при порівнянні числових даних, що отримані за допомогою створених методів розрахунків та програмних засобів, із відомими аналітичними, числовими й експериментальними даними, а також з експериментальними даними, що одержані в роботі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Створені в роботі методи, алгоритми і програмний комплекс становлять нову розрахункову базу для аналізу міцності і жорсткості СЗМ систем при їхньому контактному, електромагнітному і тепловому навантаженні, що має суттєве практичне значення, бо на цій основі можна здійснювати розрахунки складних об'єктів нової техніки і технологічного оснащення на етапах їхнього проектування, виготовлення та впровадження. Ці розробки використано у проектах електромагнітних систем токамаків і торсатронів, двох-параметричних зубчастих передач, складених матриць, індукторних систем для магнітно-імпульсного штампування.

Основні результати, рекомендації та висновки виконаних прикладних досліджень, які наведено в дисертаційній роботі, використано та впроваджено в практиці проектування на ряді підприємств України: ДП "Завод ім. Малишева" (м. Харків), Національний науковий центр "ХФТГ" НАНУ (м. Харків), Інститут машин і систем НАНУ (м. Харків), Інститут імпульсних процесів і технологій НАНУ (м. Миколаїв). Теоретичні та програмні розробки роботи використовуються у навчальному процесі НТУ "ХПІ" при виконанні студентами завдань до курсових і дипломних робіт, у навчальних дисциплінах із опору матеріалів та конструктивної міцності.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати досліджень викладені в роботах: у монографії і 22 статтях, опублікованих у журналах і збірках, затверджених ВАК України для докторських дисертацій.

Математична постановка мішаних контактних задач для СЗМ систем із урахуванням контактної взаємодії їхніх конструктивних елементів під дією електромагнітних і теплових полів, а також методи та алгоритми розв'язання таких задач створені особисто автором. Реалізація методів та алгоритмів в межах програмного комплексу SPACE-T, орієнтованого на розрахунки міцності і жорсткості СЗМ систем, здійснена автором особисто. При проведенні досліджень окремі результати були отримані за розробками програм чисельного аналізу, які здійснено під керівництвом автора за участю аспірантів С.В.

Бондаря і С.С. Зубатого, здобувача С.Ю. Шергіна, к.т.н., доц. Б.М. Кіркаче (НТУ "ХП"), що відбито у спільних публікаціях.

Математичне моделювання електромагнітних систем електрофізичних установок токамак і торсатрон виконано автором особисто. У аналізі одержаних автором закономірностей міцності і жорсткості електромагнітних систем брали участь к.т.н. Ю.А. Литвиненко (ННЦ "ХФТ"), к.т.н., доц. В.Л. Хавін (НТУ "ХП"). Експериментальне обладнання, схеми та методики до проведення експериментальних досліджень деформування моделей компаундних обмоток електромагнітних систем створені автором особисто. У проведених експериментах і при обробці даних приймав участь С.Ю Шергін (НТУ "ХП").

Математичні моделі багатошарових матриць для магнітно-імпульсного штампування тонких металевих заготовок, методика вірогідної оцінки граничної напруженості магнітного поля розроблені автором особисто. У аналізі розрахункових характеристик електродинамічних процесів, які отримано автором особисто, приймав участь д.т.н., проф. Ю.В. Батигін (НТУ "ХП"). За участю автора виготовлено експериментальне оснащення для магнітно-імпульсного штампування друкованих плат Д2-10М калькуляторів "Електроніка" та проведені експериментальні дослідження. У експериментальних роботах та в аналізі даних приймав участь аспірант О.С. Протівень (НТУ "ХП").

У формулюванні технічних завдань щодо проектування в ІМІС НАНУ циліндрово-конічних, конічних передач та при аналізі результатів розрахунків міцності і жорсткості, які отримано особисто автором, приймав участь к.т.н., с.н.с. Р.В. Ковалюх (ІМІС НАНУ).

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи обговорювалися на наукових та науково-технічних конференціях, симпозіумах, семінарах: на II та III Всесоюзних конференціях по інженерних проблемах термоядерних реакторів (Ленінград, 1981р., 1984 р.), на II Всесоюзній науково-технічній конференції "Міцність, жорсткість і технологічність виробів із композиційних матеріалів" (Єреван, 1984р.), на Всесоюзній конференції "Проблеми зниження матеріалоємності силових конструкцій" (Горький, 1984р.), на 6 Всесоюзній конференції по композиційним матеріалам (Єреван, 1987р.), на Всесоюзній конференції по нелінійній теорії пружності (Сиктивкар, 1989р.), на Республіканській науково-технічній конференції "Ефективні чисельні методи рішення крайових задач механіки твердого деформованого тіла" (Харків, 1989р.), на науково-технічній конференції "Проблеми міцності зубчастих передач і редукторного будування" (Харків, 1993р.), на Міжнародному науково-технічному семінарі "Високі технології в машинобудуванні: моделювання, оптимальна діагностика" (Харків, 1994 р.), на Міжнародних науково-технічних конференціях "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'я" (Харків 1996 р., 1997 р.), на III та IV Наукових школах "Імпульсні процеси в механіці суцільних середовищ" (Миколаїв, 1999 р., 2001 р.), на 4-му Міжнародному симпозіумі українських інженерів-механіків (Львів, 1999 р.), на Міжнародній конференції "Актуальні проблеми механіки оболонок" (Казань, 2000 р.), на 2-ій та 3-ій Міжнародних

науково-технічних конференціях “Фізичні і комп’ютерні технології в народному господарстві” (Харків, 2000 р., 2001 р.) і на ряді інших.

Дисертація розглянута й схвалена у цілому на спільному засіданні кафедр "Опір матеріалів" та "Динаміка і міцність машин" НТУ "ХПІ", 2001р.

**Публікації.** Результати досліджень, які викладено в дисертаційній роботі, опубліковано в 31 наукових працях, серед яких 1 монографія, 27 статей, надрукованих у наукових журналах і збірниках наукових праць, 3 доповіді - у трудах наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків та двох додатків. Повний обсяг роботи складає 392с., у тому числі 45 рисунків то тексту, 111 ілюстрацій на 56 стор., 5 таблиць по тексту, 9 таблиць на 3 стор., 2 додатків на 13 стор., 279 використаних літературних джерел на 26 стор.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, її наукова новизна та практична цінність, сформульовані мета й основні задачі досліджень, надано відомості про особистий внесок автора, ступінь апробації, публікації і структуру роботи.

**У першому розділі** на підставі огляду публікацій за темою роботи надано оцінки стану проблем проектування нової техніки та прогресивних технологій, аналізу конструктивної міцності і жорсткості СЗМ систем при контактній взаємодії їхніх елементів та дії полів різної фізичної природи.

Для об'єктів складної нової техніки та нових технологій розрахунки на міцність і жорсткість вимагають створення більш адекватних ніж існуючі математичних моделей і розрахункових схем, уточнених методів розв'язання крайових задач, відповідно до мішаних контактних задач для узагальненого класу СЗМ систем, особливістю яких є різна мірність їхніх структурних елементів - об'ємних, плоских, стержневих, неоднорідність властивостей, нелінійність деформування при контактній взаємодії в умовах дії інтенсивних силових, теплових та електромагнітних полів.

Серед наближених методів та схем розв'язання таких задач найбільш ефективними є метод скінченних елементів (МСЕ) у сполученні із методами послідовних наближень, зокрема, із методом змінних параметрів пружності, запропонованим І.А. Біргером, та методом пружних розв'язків, запропонованим О.А. Ілюшиним, які є широко розповсюдженими завдяки їх добрій збіжності.

Багатьма закордонними і вітчизняними авторами запропоновано різні підходи до практичної реалізації МСЕ, зокрема, J. Oden, J. Fix, G. Steng, O. Zienkiewicz, Л.О. Розін, В.О. Постнов, О.С. Сахаров, В.В. Кіслоокій та інші, які мають спільну фундаментальну основу та широко застосовуються при розробках методів розрахунку на міцність та жорсткість окремих СЗМ систем. Ідеї й алгоритми МСЕ звичайно реалізуються у програмному забезпеченні. У цьому напрямку накопичено великий досвід застосування комерційних програмних комплексів на базі МСЕ, що почали створюватися з кінця 60-х років. Серед



них відомі комплекси, що мають світову популярність й до теперішнього часу, як наприклад, ASKA, COSMOS/M, MSC/NASTRAN, SESAM-69, ANSYS та інші. Українські наукові школи механіків теж дали значний внесок у становлення і розвиток професійного використання МСЕ. Створені в Україні програмні комплекси ТЕРМОМЕХАНІКА, SAFE, ПРОЧНОСТЬ, COSAR, ЛІРА отримали добру оцінку серед користувачів.

Широкий спектр проблем фундаментального і прикладного значення, що є особливо характерним для визначення зв'язаних фізико-механічних полів у деформованих тілах, сприяв появі оригінальних публікацій. До найбільш важливих теоретичних і прикладних досліджень в області розрахунку термо-, електромагнітних і механічних процесів у різних середовищах присвячено роботи Ю.В. Батигіна, В.М. Бондалстова, Я.І. Бурака, Б.П. Галапаца, Б.М. Гнідеця, О.М. Гузя, О.Л. Кісліцина, В.Ф. Кондрата, М.Р. Короткіной, Ф.Г. Махорта, Я.С. Подстригача, В. Смайта, Р. Хольма і багатьох інших вчених.

Математичні труднощі, що пов'язані із розв'язанням контактних задач, змушують створювати різні за можливістю підходи та методи, що призвело до низки побудованих розв'язків для ряду окремих за класом контактних задач. Значний внесок у розвиток аналітичних і числових методів розв'язання контактних задач деформованих тіл внесли відомі вітчизняні та закордонні вчені, зокрема, В. М. Александров, В. О. Бабешко, О. В. Белоконь, І. Н. Векуа, І. І. Ворович, Л. О. Галін, В. Т. Грінченко, М. Губер, В.С., Б.Я. Кантор, Ю. М. Кузьмін, Р. Д. Міндлін, С. Г. Міхлін, В.І. Масаковський, В.С. Проценко, Г. Я. Попов, В. Л. Рвачов, К.М. Рудаков, Э.В. Рижов, В.І. Сакало, Я.С. Уфлянд, О. Ф. Улітко, Д. І. Шерман, І. Я. Штаерман та багато інших.

Разом з цим, існуючі методи для розв'язання прикладних контактних задач МСЕ орієнтовані на цілком певно визначений клас систем. Дотепер залишається настійна потреба у створенні ефективних методів для розв'язання більш загального класу контактних задач, зокрема, для розв'язання мішаних контактних задач для СЗМ систем, які деформуються при дії теплових та електромагнітних полів. Для цього існують умови до вирішення цієї проблеми на єдиній науково-методологічній основі, яка б базувалась на загальних принципах механіки і обчислювальних методах розв'язання нелінійних крайових задач, що дозволяють створити ефективні методи аналізу міцності і жорсткості структурно зв'язаних механічних і технологічних систем.

Аналіз проблем, стосовно до проектування та створення зубчастих передач варіаторів швидкості, основними елементами яких є складені зубчасті колеса, дозволяє прийти до висновку, що лише просторові СЕ моделі таких СЗМ систем здатні адекватно описувати процеси, що відбуваються при контактній взаємодії їхніх конструктивних елементів. При проектуванні багатозарових бандажних складених матриць, які призначені для застосування в технологіях холодного та напівгарячого видавлювання заготовок, необхідність у використанні просторових і плоских СЕ моделей обумовлено їхньою здатністю урахувати різноманітні складні механізми фрикційної контактної взаємодії та визначити раціональні параметри цих об'єктів.

Для проектів, що призначені для розробки принципово нових конструкцій електрофізичних установок, здійснюваних як прообрази нових джерел енергії за рахунок синтезу керованої термоядерної енергії, доцільно узагальнити їхні об'єкти у клас СЗМС. Основні елементи таких установок це обмотки електромагнітних систем (ЕМС), що виконують у вигляді плоских або просторово-гвинтових багатокомпонентних композицій та складають із ізольованих мідних провідників зі сталевим корпусом, вимушені деформуватися за умов дії електромагнітних полів. У межах СЗМС можна вирішити суттєво важливі практичні питання із визначення достовірної оцінки у спроможності роз'ємних обмоток в умовах високої щільності струму і напруженості електромагнітного поля, забезпечити високі вимоги до безпеки та надійності ЕМС.

Об'єкти устаткування індукторних систем, що проектуються з метою створення нових технологій магніто-імпульсної обробки металів, також доцільно віднести до класу СЗМС. Саме у таких системах має місце контактна взаємодія їхніх структурних елементів під дією сильних електромагнітних полів.

Аналіз стану проблем проектування об'єктів нової техніки і технологій, здатних вплинути на розвиток багатьох галузей промисловості, показав, що існуючі розробки для здійснення розрахунків на міцність і жорсткість не надають потрібних можливостей для вирішення цих проблем. Потрібні нові підходи, уточнені математичні моделі і розрахункові схеми та ефективні методи і алгоритми, які здатні здійснити такі розрахунки. Важливого наукового і практичного значення набувають розробки ефективних методів розрахунків на міцність і жорсткість СЗМ систем з урахуванням контактної взаємодії, нелінійного деформування їхніх елементів в умовах дії теплових та електромагнітних полів, що дозволить отримувати достовірну інформацію про працездатність нової техніки і прогресивних технологій на етапах проектування.

З цією метою доцільно створити такі методи розрахунку, які б у межах єдиної ітераційної схеми поєднували процес пошуку параметрів напружено-деформованого стану конструктивних елементів СЗМ систем із врахуванням різних видів нелінійного їхнього деформування. Створення програмного забезпечення, яке б задовольняло відповідним вимогам до узагальненого класу СЗМ систем, було б орієнтовано на розрахунки різноманітних конструкцій та мало б придатність до використання при проведенні аналізу їхнього напружено-деформованого стану є одна із основних задач досліджень за темою дисертації, що й здійснено в роботі.

**У другому розділі** надано математичну постановку нелінійних контактних задач деформування складних структурно зв'язаних механічних систем. Запропоновані методи розв'язання цих задач та описано програмне забезпечення, яке було створено в роботі. Для розрахунків на міцність і жорсткість СЗМС застосовано МСЕ у сполученні з різними ітераційними методами лінеаризації вихідної задачі. Це дозволило на єдиній методологічній основі врахувати різні механізми контактної взаємодії, пружно-пластичного деформування елементів СЗМ систем в умовах дії теплових та електромагнітних полів.

Математична постановка мішаних контактних задач для СЗМ систем, які розглянуто в роботі, сформульована стосовно до двовимірних і тривимірних деформованих тіл, на які діють нерівномірні теплові та електромагнітні поля. Механіко-математичні моделі СЗМ систем прийняті відповідно до об'єднаної області, що утворюють складені конструктивні елементи. Останні прийнято деформованими плоскими або просторовими тілами, що контактують між собою на окремих ділянках їхньої поверхні. Границя області, яка зайнята тілами, об'єднує сукупність поверхонь або ліній, які є вільними або на яких діють тиски -  $S_p$ , які є закріпленими -  $S_u$ , та ті, що є спільними та створюють так звані контактні зони -  $S_k$ .

У довільній точці суцільного матеріального середовища напружено-деформований стан підобластей СЗМ систем, що розглянуті в ортогональній системі координат, визначено тензорами напружень -  $\sigma = \sigma_{ij}$ , деформацій -  $\varepsilon = \varepsilon_{ij}$  і вектором переміщень -  $\vec{u} \{ u_i \}$ . Диференціальні рівняння руху точок в умовах дії електромагнітних полів прийняті у вигляді:

$$\text{Div} \sigma + \rho \omega \vec{E} + \mu_c (\rho \omega \vec{v} + \vec{j}) \times \vec{H} + \vec{F} = \rho \dot{\vec{v}}, \quad (1)$$

де  $\rho, \omega$  - питома маса матеріалу та щільність електричних зарядів;  $\mu_c, \varepsilon_c$  - магнітна та електрична проникність (магнітна і діелектрична постійні);  $\vec{j}, \vec{E}, \vec{H}$  - вектори щільності струму та напруженості електричних і магнітних полів,  $\vec{F}$  - вектор об'ємних сил,  $\vec{v} = \dot{\vec{u}}$  - вектор швидкості точки. Другий і третій доданки в (1) складають силу Лоренца, віднесену до одиниці об'єму:

$$\vec{F}_p = \rho \omega \vec{E} + \mu_c (\rho \omega \vec{v} + \vec{j}) \times \vec{H}. \quad (2)$$

При відсутності вільних електричних зарядів у повільно рухомому середовищі напруженості електричних і магнітних полів задовольняють рівнянням Максвелла:

$$\text{rot} \vec{H} = \varepsilon_c \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \rho \omega \vec{v} + \vec{j}, \quad \text{rot} \vec{E} = -\mu_c \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{H} = 0, \quad \varepsilon_c \text{div} \vec{E} = \rho \omega. \quad (3)$$

Рівняння (3) доповнюються матеріальними співвідношеннями, які у разі нехтування конвективними струмами й ефектом Хіла, записуються для точок областей у вигляді співвідношень для векторів індукції електричних і магнітних полів -  $\vec{D}, \vec{B}$  так  $\vec{D} = \varepsilon_c \vec{E}$ ,  $\vec{B} = \mu_c \vec{H}$ ,  $\vec{j} = \gamma_c \vec{E} + \gamma_c [\dot{\vec{u}} \times \vec{B}]$ .

Для випадків, коли електропровідні тіла, які складають СЗМ систему, контактують із зовнішніми неполяризованими електропровідними тілами або неполяризованими не електропровідними середовищами із властивостями близькими до властивостей вакууму, рівняння Максвелла в областях зовнішнього середовища мають вигляд:

$$\text{rot} \vec{H}_v = \varepsilon_c \frac{\partial \vec{E}_v}{\partial t} + \vec{j}_v, \quad \text{rot} \vec{E}_v = -\mu_c \frac{\partial \vec{H}_v}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{H}_v = 0, \quad \varepsilon_c \text{div} \vec{E}_v = \omega_v, \quad (4)$$

де  $\vec{j}_v$ ,  $\vec{E}_v$ ,  $\vec{H}_v$  - вектори густини струму, напруженості електричних і магнітних полів у зовнішній області,  $\omega_v$  - задана функція густини електричних зарядів. У початковому стані прийнято  $\vec{u} = \vec{v} = 0$ ,  $\vec{E} = \vec{H} = \vec{E}_v = \vec{H}_v = 0$ .

Із закону збереження зарядів у електропровідних тілах у випадку термодинамічної рівноваги і при відсутності в початковому стані розподілених зарядів, легко знайти, що густина розподілу електричних зарядів у тілі буде залишатися рівною нулю. У прийнятому наближенні, із (2) можна встановити, що сила Лоренца визначається так:

$$\vec{F}_p(x_i) = \mu_c \vec{j} \times \vec{H}, \quad (5)$$

а квазістатична рівновага точок матеріальних підобластей СЗМ системи визначиться диференціальними рівняннями виду:

$$\sigma_{ij,j} + \vec{F}_{pi} + \vec{F}_i = 0. \quad (6)$$

Прийнято, що на поверхні розподілу тіл із неполяризованими не електропровідними середовищами діє задане зовнішнє силове навантаження, яке визначено вектором  $\vec{p}$  із компонентами  $p_{in}$ . У цьому випадку, на поверхні із розподіленими зарядами і струмами у точках з зовнішньою нормаллю до поверхні тіла -  $\vec{n}$ , вектор механічного напруження  $\vec{\sigma}_n = \sigma \cdot \vec{n}$  повинен врівноважуватися вектором зовнішніх сил  $\vec{p}$  та силою дії електромагнітного поля:

$$\vec{\sigma}_n = \vec{p}_n + \frac{\Omega}{2}(\vec{E} + \vec{E}_v) + \frac{\mu_c}{2}(\Omega \vec{v}_\tau + \vec{i}) \times (\vec{H} + \vec{H}_v), \quad (7)$$

де  $\Omega$ ,  $\vec{i}$  - щільності поверхневих зарядів і струмів,  $\vec{v}_\tau$  - проекція вектора швидкості точки на площину, дотичну до границі тіла.

Умови сполучення електромагнітних полів на поверхні тіл прийняті у вигляді відомих із електродинаміки рівнянь для нерухомих середовищ:

$$\epsilon_c(E_{vn} - E_n) = \Omega, (H_{vn} - H_n) = 0, \vec{n} \times (\vec{H}_v - \vec{H}) = \vec{i} + \vec{v}_\tau \Omega, (E_{v\tau} - E_\tau) = -\mu_c v_n (\vec{i} + \vec{v}_\tau \Omega),$$

де  $\vec{E}_v$ ,  $\vec{H}_v$  -  $\epsilon$ , відповідно, напруженості електричних і магнітних полів у зовнішньому до матеріальної підобласті середовищі, які задовольняють рівнянням (4) та мають нормальні  $-E_{vn}$ ,  $H_{vn}$  й дотичні  $-E_{v\tau}$ ,  $H_{v\tau}$  проекції на поверхню сполучення,  $v_n$ ,  $\vec{v}_\tau$  - нормальна та дотична складові вектора швидкості  $\vec{v} = \dot{\vec{u}}$ .

Зокрема, для випадків, коли функції розподілу електричних зарядів  $\omega_v$  і токи  $\vec{j}_v$  є відмінними від нуля лише в обмеженій області зовнішнього середовища й на поверхні електропровідного тіла відсутні зовнішні електричні заряди і струми, то у (7) слід покласти  $\Omega=0$ ,  $\vec{i}=0$ . Тоді умови на поверхні -  $S_p$  приймуть вид:

$$\sigma_{ij} n_j = p_{in}, \quad \forall x \in S_p, \quad (8)$$

а на поверхні сполучення електромагнітних полів можна записати:

$$E_{vn} = E_n, E_{v\tau} = E_\tau, \vec{n} \times (\vec{H}_v - \vec{H}) = 0, H_{vn} = H_n. \quad (9)$$

Величини, якими визначається вплив електромагнітних полів на процеси деформування елементів СЗМ систем, входять у рівняння (7) - (9). Їх можна отримати шляхом

інтегрування рівнянь Максвела (3), (4), відповідно до електромагнітних полів у матеріальних тілах і зовнішньому середовищу, при заданих початкових і крайових умовах.

Геометричні рівняння при малих деформаціях елементів СЗМ систем приймалися відповідними лінійними співвідношеннями Коші:

$$\varepsilon_{ij} = 0.5(\mathbf{u}_{i,j} + \mathbf{u}_{j,i}), \forall x_i \in V; \mathbf{u}_i = \mathbf{u}_i^*, \forall x_i \in S_u. \quad (10)$$

У межах прийнятих вище припущень та при нехтуванні зв'язаністю деформацій із електромагнітними полями, узагальнені рівняння стану прийняті у вигляді тензорно-лінійних співвідношень:

$$\varepsilon_{ij} = A_{ijkl}\sigma_{kl} + \alpha_{ij}\Delta T, \quad (11)$$

де  $A_{ijkl}$ ,  $\alpha_{ij}$  - компоненти тензорів, якими визначаються властивості деформування та температурного розширення матеріалу. Більшість конструкційних матеріалів можна розглядати кусково-однорідними із різними фізико-механічними властивостями у межах однорідних областей. Останні можуть відповідати ізотропним або анізотропним матеріалам. У межах пружного деформування співвідношення (11) відповідають узагальненому закону Гуку.

Для пружно-пластичного деформування ці співвідношення у формі змінних параметрів пружності відповідають теорії малих пружно-пластичних деформацій Ілюшина і компоненти тензора  $A_{ijkl}$  визначаються так:

$$A_{ijkl} = \frac{1}{E_*} (\mathbb{1} + \nu_*)\delta_{ik}\delta_{jl} - \nu_*\delta_{ij}\delta_{kl}, \quad (12)$$

де  $E_*$ ,  $\nu_*$  - змінні параметри пружності, які мають звісні вирази через інтенсивності напружень і деформацій, що є зв'язаними за діаграмою деформування матеріалу. Співвідношення (11), (12) є справедливими для простих чи близьких до них процесів навантаження.

Для складних процесів навантаження доцільно застосовувати теорії пластичного плину. У роботі застосовані теорія Прандтля-Рейса із співвідношеннями:

$$d(\varepsilon_{ij})_p = \frac{1}{2G} \left[ d\sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{3\nu}{1+\nu} d\sigma_0 \right] + \frac{1}{\sigma_i} \sqrt{\frac{3}{2} d(\varepsilon_{ij})_p d(\varepsilon_{ij})_p} (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0), \quad (13)$$

до яких додано залежність між інтенсивністю напруження та мірою пластичної деформації у вигляді  $\sigma_i = H(\chi(\varepsilon_i^p), T)$ , та теорія пластичності, що є асоційованою з умовами пластичності для ізотропних матеріалів із трансляційним анізотропним зміцненням:

$$d\varepsilon_{ij} = A_{ijkl}d\sigma_{ij} + \phi_{ij}dT. \quad (14)$$

На відміну від (11), співвідношення стану (13) та (14) мають диференціальну форму, що є суттєвим для створення алгоритмів розрахунку.

У загальному випадку, для точок контактних поверхонь контактні умови записують у вигляді наступних нерівностей:

$$\mathbf{u}_n^{m-1} + \mathbf{u}_n^{m+1} - \delta_{on}^m \leq 0, \quad \sigma_{nn}^m \leq 0, \quad (15)$$

де  $u_n^{m-1}$ ,  $u_n^{m+1}$ ,  $\delta_{on}^m$  - нормальні переміщення точок контактних поверхонь і початковий зазор,  $\sigma_{nn}^m$  - нормальні напруження на цих поверхнях.

При зникненні між тілами початкового зазору на контактній поверхні утворюється контактний тиск. За фізичним уявленням, перша нерівність у (15) є умовою для “непроникнення” контактуючих тіл. Взагалі, замість нерівностей (15) можна використовувати таке рівняння:

$$(u_n^{m-1} + u_n^{m+1} - \delta_{on}^m) \sigma_{nn}^m = 0. \quad (16)$$

Механізми контактної взаємодії тіл у відповідних точках контактних поверхонь моделювались в роботі шляхом введення у межах можливої області контакту між тілами суцільного контактного шару із спеціально заданими характеристиками. Саме за рахунок вибору останніх й моделювались різні механізми контакту. Такий прийом дозволяє розглядати взаємодію тіл із шаром, який повинен мати задані нелінійні характеристики та зводить “зовнішню” нелінійність задачі, яка має місце внаслідок умов (15) або (16), до “внутрішньої” нелінійності. За допомогою такого прийому можна досить точно описати механізми контактної взаємодії тіл - зчеплення, ковзання, сухе тертя.

Системи рівнянь (6) - (10), (11) або (6) - (10), (13) або (14), які необхідно конкретизувати додатковими співвідношеннями для визначення фізико-механічних властивостей матеріалів і контактних шарів, разом із додатковими умовами типу (15) або (16) утворюють замкнені системи рівнянь для розв’язання мішаної контактної задачі. Ці системи рівнянь використані у подальшому при розгляді квазістатичних процесів термопружно-пластичного деформування елементів СЗМ систем в умовах дії на них зовнішніх силових, електромагнітних полів та заданому розподілі теплових полів.

В основу методу розв’язання мішаних контактних задач покладено варіаційний принцип Лагранжа. Розглянуті варіаційні рівняння Лагранжа як для повних переміщень точок деформованих тіл, так і для їхніх приростів на малому шагу довантаження. Розв’язання задачі зведено до пошуку стаціонарної точки функціоналу Лагранжа стосовно для СЗМС, конструктивні елементи яких навантаженні поверхневими, об’ємними й пондеромоторними силами. Для цього використано метод скінченних елементів (МСЕ).

З метою розв’язання просторових задач деформування тіл за МСЕ розглянуто ізопараметричні косокутні об’ємні скінченні елементи із восьми вузлами та прийнято білінійні апроксимації для переміщень в таких СЕ. Пріоритетність вибору саме таких типів СЕ в роботі пояснюється тим, що при їхньому застосуванні сітки дискретизації є топологічно-регулярними, не потребують побудови матриць індексів, що суттєво скорочує обсяг вихідної інформації про геометрію об’єктів.

Між взаємодіючими тілами, у межах очікуваної області контакту, введені “контактні” шари. Останні поєднують тіла в суцільну систему та їх використано для реєстрації ділянок контакту. Для дискретизації “контактного” шару в роботі запропоновано використовувати призматичні скінченні елементи із восьми вузлами. Матеріал шарів приймався анізотропним. Такий шар є здатним до моделювання властивості прошарку між тілами, що звичайно утворюється внаслідок реальної їхньої шорсткості. Для цього, висота мікро-нерівностей призначалась рівною величині зближення тіл, а за цим жорсткість шару

визначалась відповідною до жорсткості прошарку. Зауважимо, що із підвищенням жорсткості шару і зменшенням його товщини зменшується різниця між нормальними до взаємодіючих поверхонь переміщеннями вузлів СЕ "контактного" шару. Це може призвести до критично малих різниць між цими величинами, а при обчислюванні деформацій шару - до суттєвих обчислювальних похибок. Числові експерименти показали, що у разі прикладних розрахунків достатня точність забезпечується, якщо прийняти жорсткість СЕ "контактних" шарів на 3-4 порядку вищою, ніж жорсткість СЕ тіла.

При розгляді нормальної взаємодії без тертя "контактному" шарові призначались параметри пружності, що відповідають його деформуванню лише у напрямку загальної нормалі до поверхні розділу контактуючих тіл. При наявності сил тертя, до складу пружних параметрів "контактного" шару вводили зсувну жорсткість та її значення приймалось відповідним до одного із матеріалів тіл, що контактують.

Прийняті в роботі "контактні" елементи максимально спрощують алгоритм розв'язання мішаної контактної задачі, дозволяють зберігати структуру і порядок рівнянь, до яких зведені задачі за МСЕ. Насамперед, головним є те, що такі елементи дозволяють досить повно моделювати різні фізико-механічні механізми контакту тіл за рахунок призначення контактному шарові при деформуванні різноманітних анізотропних властивостей.

Далі розглянуто методику розв'язання сформульованої вище задачі, яку побудовано на загальній методологічній основі. Для цього, навантаження розглядалось здійснюваним із додаванням малих приростів, а визначення напружено-деформованого стану на кроці навантаження здійснювалось за схемами простих ітерацій із розв'язанням відповідних систем рівнянь МСЕ:

$$[K^{N-1}] \{U^N\} = \{P\} - \{R^{N-1}\}, \quad (17)$$

що побудовано в роботі на підставі звісного методу змінних параметрів пружності, запропонованого І. А. Біргером, або

$$[K(\{\Delta U\}^{N-1})] \{\Delta U\}^N = \{P\} - \{F_k\} - \{\Delta R(\{\Delta U\}^{N-1})\} - \{\Delta E_p\}, \quad (18)$$

що побудовано для застосування співвідношень виду (13), (14).

У рівняннях (17), (18) позначено:  $N$  - номер ітерації,  $[K]$  - глобальна матриця жорсткості,  $\{U\}$ ,  $\{\Delta U\}$  - вектори-стовпці вузлових переміщень або їхні прирости, які відповідні розглянутій СЕ моделі СЗМ системи,  $\{R\}$ ,  $\{\Delta R\}$ ,  $\{\Delta E_p\}$ , - вектори-стовпці узагальнених додаткових навантажень. Наведені в роботі матриці жорсткості  $[K]$  і вектори  $\{R\}$ ,  $\{\Delta R\}$ ,  $\{\Delta E_p\}$  є нелінійно залежними від пошукових вузлових переміщень або їхніх приростів.

Ітерації подовжуються до стабілізації модуля векторів  $\{U\}$  або  $\{\Delta U\}$ . На кожній ітерації визначаються параметри напружено-деформованого стану, зони пластичності та контакту або ковзання.

Для розв'язання систем рівнянь (17), (18) використано метод Гаусса, що реалізовано за схемою Холецького. При дискретизації СЗМС у запропонованих алгоритмах для різних

підобластей задавали групу ознак, відповідних до матеріалів, орієнтації осей анізотропії, типу SE "контактного" шару та інші.

Розроблені алгоритми до розв'язання мішаних контактних задач з метою розрахунку на міцність і жорсткість СЗМС були реалізовані у створеному в роботі програмному комплексі - ПК SPACE-T. Головне призначення цього ПК це автоматизовані розрахунки на міцність і жорсткість елементів конструкцій, вузлів та деталей машин, які призначені до експлуатації в умовах дії теплових, силових та електромагнітних полів. В розрахунках враховуються пружне та пружно-пластичне деформування матеріальних тіл, анізотропні механічні властивості та контактна взаємодія елементів механічних та технологічних систем. ПК SPACE-T створено на єдиній методологічній основі та дозволяє провадити аналіз напружено-деформованого стану широкого класу СЗМ систем, об'єкти яких мають довільну геометричну конфігурацію і в межах комплексу моделюються за розрахунковими схемами, що відповідають одномірним, двомірними плоским, вісесиметричним та тривимірним SE моделям.

Для встановлення достовірності розрахункових даних, що можна отримувати при застосуванні створеного ПК, були виконані дослідження із тестуванням ПК шляхом розв'язання серії задач, які раніше були розв'язані різними авторами. Ці дослідження включали оцінювання збіжності наближених розв'язків при різному ступені дискретизації моделі СЗМ систем, проведення аналізу напружено-деформованого стану тіл різної мірності при контактній взаємодії із тертям, порівняння розрахункових даних із наведеними в літературі. Зокрема, розрахункові данні та визначені за цим коефіцієнти концентрації напружень були порівняні з експериментальними даними, які встановлені на натурних моделях пуансонів для видавлювання матеріалів, що виготовлені із оптично активного матеріалу. Порівняння результатів із відомими показали, що максимальні розбіжності для найбільш складних випадків не перевищували 15%. Це дозволило зробити висновок про високу достовірність результатів, що були отримані із застосуванням створеного в роботі ПК SPACE-T.

Для моделювання конструктивних елементів ряду СЗМ систем доцільно застосувати одномірні стрижневі моделі із просторовою конфігурацією. До розрахунків на міцність і жорсткість цих систем застосовано ефективний та чисельно - стійкий алгоритм методу прогонки, що запропоновано С.К. Годуновим. В роботі розглянуто методику розрахунків таких СЗМ систем та наведено опис спеціального програмного забезпечення, що окремо було створено та тестувалося в роботі. У цьому розділі, за загальною методологією розглянуто математичні постановки задач аналізу напружено-деформованого стану для цих СЗМ систем. Показано, що такі задачі на кожній ітерації можна звести до розв'язання систем лінійних диференціальних рівнянь першого порядку із додатковими умовами спряження та крайовими умовами. У подальшому, при розрахунках обмоток електромагнітних систем (ЕМС) токамаків, встановлені основні переваги цього методу у порівнянні із МСЕ.



Створені в роботі програмні розробки успішно використані у дослідженнях напружено-деформованого стану та розрахунках міцності і жорсткості СЗМ систем, відповідних до проєктованих нових конструкцій машин, електрофізичних установок та технологічних систем. Результати дослідження, які здійснені для нових двох-параметричних зубчастих передач (ЗП) - варіаторів швидкості, що проєктовані для транспортної техніки, конструкцій складених бандажних матриць (СБМ), які використовують для холодного і напівгарячого видавлювання наведені **в третьому розділі** роботи.

Дослідження, що виконані в роботі для нових механічних ЗП із дрібно-дискретною зміною передатного відношення та для конструкцій СБМ, розглянуто в цьому розділі як дослідження єдиного класу СЗМ систем. Таке об'єднання пов'язано із збіжністю для них ряду спільних ознак у напрямках проєктування, умовах експлуатації та у суттєвої ролі нелінійних ефектів деформування при контактному навантаженні. По-перше, при проєктуванні таких об'єктів передбачається застосування нових конструкційних матеріалів, які є суттєво неоднорідними та анізотропними. По-друге, за призначенням цих об'єктів, їхня експлуатація можлива лише при контактній взаємодії робочих поверхонь з утворенням зон контакту й відриву, ковзання, наявністю перекосів, зазорів, натягів. Окрім цього, для цих об'єктів є велика вірогідність нелінійного пружно-пластичного деформування структурних елементів. У даному розділі надані результати комплексного дослідження, яке виконано на основі просторових СЕ моделей.

Розглянуто нові циліндрово-конічні та конічні зубчасті передачі для просторових варіаторів швидкості. Здійснено аналіз напружено-деформованого стану та з урахуванням типових механізмів контактної взаємодії елементів ЗП встановлені оцінки працездатності запропонованих конструкцій. Далі аналогічні дослідження виконані для нової схеми плоского зубчастого варіатора. Виявлено найбільш вірогідні небезпечні режими навантаження, що відповідають зачепленню одного з малих зубчастих коліс на максимальній вздовж радіусу відстані, коли передатне відношення є мінімальне. Для несучого диска із спіральними пазами сформульовані рекомендації до проєктування його із змінною товщиною, що відповідає оптимальності за критеріями міцності.

Далі розглянуті узагальнені СЕ моделі для СБМ. На рис.1 ілюстрована СЕ модель складеної матриці із цільною робочою вставкою. У контактному шарі, який розташовано між внутрішньою поверхнею вставки і заготівкою, що деформується, застосовані СЕ, які придатні до моделювання взаємодії із тертям за законом Кулона. У контактному шарі, який розташовано між робочою вставкою і бандажем, застосовані СЕ, які придатні до моделювання попереднього натягу. Внутрішня конусна поверхня бандажа має виконуватись за умовами спрямування до зовнішній конусній поверхні бандажа. Як в областях із концентраторами напруження, так і в зонах контакту, сітки СЕ значно згущались. Деформування заготівок описано СЕ моделями, що відповідні законам пружно-пластичного деформування матеріалів із лінійним зміцненням.

У дослідженнях визначено суттєвий вплив величин натягу на деформований стан поверхні робочої вставки та раціональні, за рівнем інтенсивності напружень в точках по-

верхні вставки, значення натягу. Показано, що при збільшенні жорсткості бандажа суттєво знижується інтенсивність напружень у зонах концентрації. На рис.2 надані залежності між інтенсивністю напружень та величиною натягу в найбільш небезпечному перерізі робочої вставки для різних співвідношень між жорсткостями бандажа та вставки.

Визначено рівень натягу між бандажем і вставкою, при якому величини інтенсивності напружень на внутрішній поверхні зніжуються на 15-20% від того, що має місце у разі його відсутності. Розглянуто результати досліджень та надано аналіз конструкційної міцності і жорсткості для ряду перспективних конструкцій СБМ. Надано практичні рекомендації по вибору раціональних кутів нахилу конусних поверхонь та параметрів охолодження для проєктованих СБМ, які призначено для здійснення напівгарячого видавлювання. Запропоновані рекомендації до підвищення ефективності технології видавлювання, що використано при створенні конструкторській документації до виготовлення складених бандажних конічних матриць - СБК-1, які застосовують при напівгарячому видавлюванні напівконічних втулок.

У **четвертому розділі** наведено результати досліджень, які виконані в роботі з метою вирішення проблем проєктування ЕМС токамаків і торсатронів. У дослідженнях ці системи поділені на два типи, що відповідають конструкціям ЕМС із плоскими та гвинтовими обмотками. При застосуванні у розрахункових схемах для них стрижневих моделей, відповідно приймалися плоскі та просторові криволінійні стержні, які мали дискретно розташовані на пружних опорах підкріплення. Пондеромоторні сили визначались окремо та були, за умовами їхньої еквівалентності, приведені до криволінійних осей стержнів у вигляді зовнішніх сил із заданим розподілом. Дослідження виконані за напрямками, які сформульовано в роботі для кожного типу розглянутих розрахункових схем.

Для обох типів ЕМС прийнято припущення про монолітність багатокомпонентних котушок, що відповідає функціональному призначенню обмотки ЕМС та технології їхнього виготовлення. У цьому розділі роботи наведено експериментальне обґрунтування такого припущення та теоретично побудовані стержневі моделі обмотки ЕМС. Відповідно до цих моделей визначені приведені жорсткості багатокомпонентних у перерізі стержнів при згині в двох площинах та крутильна. Експериментальні дослідження провадились як на безкорпусних, так і на корпусних зразках обмотки ЕМС. Отримані експериментальні данні дозволили обґрунтувати ступінь достовірності запропонованих розрахункових схем обмоток ЕМС та перевірити точність визначення еквівалентних жорсткостей. У експериментальних дослідженнях отримані дані про характер взаємодії структурних елементів обмотки. Встановлено, що розподіл деформацій по шарах моделі обмотки є близьким до лінійного закону, а ковзання між провідниками й ізоляцією є практично відсутнім, що дозволяє їм нехтувати при розрахунках обмоток ЕМС.

Далі, у цьому розділі, розглянуто результати досліджень щодо гвинтових обмоток торсатрона "Ураган-М" та D - образних плоских котушок токамака ТБ-0. Параметри обмоток для цих проєктів були визначені за технічними умовами до забезпечення утримуючих властивостей пастки для плазми та призначених характеристик і конфігурації маг-

нітних поверхонь. У розрахункових дослідженнях одержані данні для аналізу напружено-деформованого стану ЕМС. Оцінки працездатності таких електрофізичних установок встановлено за критеріями міцності і жорсткості їхніх ЕМС, що дозволило сформулювати рекомендації щодо їхнього проектування. Представлені результати розрахунків напружено-деформованого стану обмоток ЕМС, за якими для двох - і трьох-західних гвинтових обмоток торсатрона "Ураган-М" визначено параметри жорсткості дискретних опор, що забезпечують нормативні вимоги до працездатності таких систем. Для D - образних плоских котушок визначено закон розподілу параметрів жорсткості, за яким практично розвантажується кожний роз'їм токамака ТБ-0.

На базі стрижневих моделей для проєктованих ЕМС, в роботі здійснено розв'язання задачі про вагову оптимізацію обмотки за критерієм матеріалоємності із обмеженнями на конструктивні параметри, якими визначається міцність обмотки. Необхідні умови оптимальності сформульовано на основі принципу максимуму для розширених функціоналів Лагранжа. Необхідні умови оптимальності задовольнялись за методом послідовних наближень для пошукових змінних. Враховуючи функціональні обмеження, визначено оптимальні форми осей котушок та розподіли товщини корпусу обмотки.

Розподіли товщини корпусу (вихідний - 1, оптимальний -2) для плоских D-образних котушок, які моделювались двохкомпонентними стержнями, проілюстровано на рис.3, справа.

Рис.3. Вагова оптимізація корпусу обмотки ЕМС токамака ТБ-0

Оптимальний, за умов мінімуму ваги котушки, розподіл товщини корпусу обмотки приводить до ваги її корпусу, яка є меншою на 55% від вихідної ваги. Ітераційний алгоритм за 17 ітерацій задовольняє необхідні умови оптимальності з точністю 5%. Відповідно до технологічних можливостей при виготовленні котушок запропоновано наближену кусково-постійну апроксимацію - 3 (рис.3). При цьому наближенні зниження ваги корпусу складає 47% .

У **п'ятому розділі** наведено результати комплексних досліджень, які виконані в роботі з метою вирішення проблем щодо створення індукторних систем для плоского магнітно-імпульсного штампування тонколистових електропровідних металевих заготівок. Запропоновані розрахункові схеми та моделі, які відповідають СЗМ системам, що розглянуті у попередніх розділах. Для цих систем є характерним те, що контактна взаємодія між окремими їхніми елементами здійснюється за умов дії імпульсних електромагнітних полів. Процеси деформування в індукторних системах порушені пондеромоторними силами внаслідок створення необхідного для реалізації технології обробки заготівки магнітного тиску. Рівень магнітного тиску та його розподіл по поверхні електропровідної заготівки повинен забезпечувати якісні показники для виготовлених виробів та економічність технології. Загальне розв'язання рівнянь Максвелла дозволяє визначити тиск на поверхні заготівки у вигляді:

$$p = \frac{\mu_0}{2} (H_1^2 - H_2^2), \quad (19)$$

де  $H_1, H_2$  - є напруженості магнітного поля на граничних поверхнях.

Силовий вплив буде найбільшим при існуванні поверхневого ефекту дифузії поля в провіднику, що є характерним для масивних заготовок. Для тонкої металевої заготовки через істотний ріст дифузії магнітного поля глибина проникнення магнітного поля є значною та тиски є досить малими. Тому традиційні технології обробки магнітним тиском придатні для масивних провідних заготовок стають непридатними при оброблюванні тонких заготовок.

Для плоского штампування тонких металевих заготовок запропоновано використати комбіновані шарові матриці, які складають із діелектричної пластини та розташованої на ній сталевій накладці з рисунком для штампування.

У розділі надано розв'язок рівнянь Максвелла (3) для випадку застосування індуктора зі спареними токовими проводами, схема якого показана на рис.4. При припущеннях, що відповідні тонкостінним заготовкам, умовам збудження саме плоских хвиль і симетрії системи, рівняння (3) розв'язані за методом Лапласа. На цій підставі отримано розподіл магнітного тиску на поверхні заготовки, що є змінюваним у часі. У експериментальному та розрахунковому дослідженнях розглянуто індуктор, схема якого надана на рис.4, із параметрами:  $2 \cdot a = 3$  мм,  $2 \cdot b = 53$  мм,  $s = 2$  мм при частоті магнітного поля 16,7 та 50 кГц, які реєструвались по осцилограмам напруженості поля. Вироби виготовлювались із мідної фольгової заготовки з товщиною  $\delta = 50$  мкм. Експерименти провадились на спеціальному стенді, який призначено для досліджень індукторних систем. На рис.5 надано розподіл тиску вздовж поперечної відносної координати в момент часу, що відповідає першому максимуму функції струму в робочій зоні індуктора. Точками на рисунку показані дані вимірювання, а кривими - розрахункові дані. У центрі та на зовнішніх границях робочої зони між цими даними є деяка розбіжність, але ці дані досить добре збігаються в області робочої зони.

Рис.5. Розподіл магнітного тиску на поверхні заготовки

Рис.4. Схема індуктора із спареними токовими проводами

Розрахункові схеми індукторної системи для штампування довгих смуг та квадратних отворів в мідних фольгових заготовках з товщиною 50 мкм, які симетрично розміщені у робочій зоні, прийняті відповідними до плоских і просторових моделей СЗМ систем, що розглядались у попередніх розділах роботи. Для адекватного моделювання контактної взаємодії між заготовкою і сталевією накладкою, а також між накладкою і діелектричною основою, були ведені контактні шари. Між накладкою і заготовкою враховано тертя.

За розрахунковими дослідженнями встановлено, що при штампуванні отворів в листовій заготовці саме у точках контуру отвору виникають найбільші дотичні напруження. З метою підвищення якості штампованих виробів визначені ефективні параме-

три для комбінованих шарових матриць. Основна увага при аналізі впливу геометричних параметрів матриць на якість відтворення форми штампованих отворів в заготівки приділялась уточненому моделюванню контактної взаємодії між заготівкою і накладкою. Вивчено вплив тертя між заготівкою і накладкою, товщини та кута скосу у сталевій накладці на напружено-деформований стан заготівки при штампуванні. При магнітному тиску, в умовах дії якого дотичні напруження на контурі штампованих отворів досягають граничних рівнів, в сталевій накладці інтенсивності напруження є нижчими рівня текучості, що сприяє якісному відтворенню геометричного рисунку контуру отворів. Встановлено, що за рахунок концентрації напружень найбільш навантаженими зонами в мідній заготівці є околиці крайок. При штампуванні квадратного отвору максимальні рівні дотичних напружень й інтенсивності напруження в заготівці спостерігаються у кутових точках. Один з шляхів для досягнення однорідного розподілу дотичних напружень вздовж контуру отвору полягає у згладжуванні кутів матриці. Це можна здійснити за рахунок вибору радіуса кола згладжування, але тоді, коли це не порушує якості відтворення форми отвору. Показано, що якісні показники процесу штампування поліпшуються із підвищенням сил тертя між заготівкою і сталеву накладкою. На цій основі надані обґрунтовані рекомендації до раціонального проектування комбінованих шарових матриць. Представлено методикку для ймовірно-статистичного аналізу, що можна здійснювати при вивченні впливу на магнітні тиски ймовірних відхилень для ряду основних параметрів в системі індуктор - заготівка. Наведені результати дослідження із впливу частотних характеристик магнітного поля для штампування на нестационарне деформування елементів індукторної системи. Процеси вивчались на прикладах із штампуванням прямокутних і колових отворів в тонких заготівках.

Аналіз механічних процесів, які вивчались в роботі з приводу застосування комбінованих шарових матриць в магнітно-імпульсному штампуванні тонких електропровідних металевих заготовок, дозволяє зробити висновок про ефективність таких технологічних систем. Достовірність висновків встановлено за даними експериментальних досліджень із штампуванням друкованих плат, що дозволило впровадити магнітно-імпульсне штампування до сучасного виробництва друкованих плат. Експериментально були реалізовані різні підходи до здійснення цієї актуальної операції, що сприяло підвищенню якості виготовлених зразків плат, які застосовують у зарядно-випрямних пристроях Д2-10М для мікрокалькуляторів “Електроніка”.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, на єдиній методологічній основі створені нові методи для розрахунків на міцність і жорсткість неоднорідних структурно зв'язаних механічних систем, які орієнтовані на вирішення проблем проектування та створення нової техніки і прогресивних технологій, призначених до експлуатації в умовах дії електромагнітних,

теплових і силових полів. На сучасному теоретичному рівні із використанням фундаментальних доробок в області нелінійної механіки, моделювання процесів деформування неоднорідних анізотропних тіл та обчислювальних методів розв'язані нові задачі в області динаміки та міцності машин. У сукупності результати роботи вирішують крупну науково-технічну проблему, яка є актуальною, науково і практично значущою для автоматизованого проектування нової техніки. Нові результати і висновки, які отримані особисто автором у завершеному вигляді комплексного дослідження по темі роботи, складають суттєвий науковий внесок у розвиток спеціальності 05.02.09 - динаміка та міцність машин.

Практична значимість результатів роботи полягає в тому, що створене в роботі програмне забезпечення для розрахунків на міцність і жорсткість СЗМ систем надає можливість виконувати аналіз міцності і жорсткості нової техніки і технологічного устаткування на етапах проектування і створення, та в тому, що надані в роботі науково-обґрунтовані висновки і рекомендації вже використані при проектуванні і створенні нових електромагнітних систем токамаків і торсатронів, індукторних систем для магнітно-імпульсного штампування, зубчастих варіаторів швидкості і складених бандажних матриць для видавлювання у енергетичній, транспортній й обробляючій галузях промисловості України.

Найбільш важливі наукові і практичні результати роботи полягають у наступному.

1. За зробленою оцінкою стану проблеми по темі дисертації сформульовано висновок, що існуючі дотепер традиційні методи не дозволяють безпосереднє їхнє використання у розрахунках на міцність і жорсткість цілого ряду складних технічних систем, які віднесено до класу структурно зв'язаних механічних систем, до якого можна віднести техніку і технології, принципи роботи яких засновані на використанні інтенсивних електромагнітних, теплових і силових полів, що створюють для застосування у сучасній енергетиці, в транспортній й обробляючій галузях промисловості. Саме потребами промисловості у створенні нової техніки і технологій, що здатні зберігати матеріальні та енергетичні ресурси, відповідати екологічним вимогам виробництва й експлуатації, визначено необхідність у створенні нових методів розрахунку на міцність і жорсткість СЗМ систем із урахуванням дії на них електромагнітних і теплових полів, з метою науково обґрунтованого проектування таких систем.

2. Уперше, на єдиній методологічній основі, в межах сформульованого в роботі загального підходу до розрахунків на міцність і жорсткість неоднорідних СЗМ систем, надано узагальнену математичну постановку мішаних контактних задач для таких систем, яка враховує різну мірність їхніх структурних елементів, різноманітні механізми їхньої контактної взаємодії, нелінійність пружно-пластичного деформування при контактному та електромагнітному навантаженні. На базі одномірних просторово-стрижневих моделей, МСЕ із двовимірними і тривимірними СЕ запропоновані моделі СЗМ систем, методи та алгоритми розв'язання сформульованих нелінійних мішаних контактних задач, які орієнтовані на застосування МСЕ та чисельно стійкого методу ортогональної прогонки у сполученні із ітераційними методами послідовних наближень. Для оцінки СЗМ систем за

критеріями працездатності використані добре обґрунтовані в інженерній практиці критерії міцності і жорсткості.

3. Для адекватного моделювання контактної взаємодії елементів СЗМ систем на базі МСЕ запропоновані спеціальні алгоритми, засновані на введенні у межах можливої області контакту "контактних шарів", які здатні моделювати різні механізми контактної взаємодії між елементами таких систем та дозволяють ефективно визначити області контакту і відриву. Запропоновано методику для визначення фізико-механічних властивостей контактних шарів, зокрема й нелінійних, за рахунок яких здійснюється моделювання різних механізмів взаємодії тіл на контактних поверхнях елементів СЗМ систем.

4. Створено програмне забезпечення для розрахунків на міцність і жорсткість СЗМ систем у виді ПК SPACE-T, який орієнтовано на використання сучасних ІВМ - сумісних комп'ютерів, та дозволяє провадити розрахунки на міцність і жорсткість складних технічних і технологічних систем на етапах їхнього проектування, модернізації і доведення.

5. Виконані дослідження із достовірності запропонованих методів і програмного забезпечення шляхом тестування при розв'язанні ряду прикладів, для яких відомі числові розв'язки або експериментальні результати. У цих дослідженнях розглянуті питання збіжності наближених розв'язків контактних задач в залежності від ступеня дискретизації моделей СЗМ систем. Установлено властивості алгоритмів і розв'язків контактних задач для різних механізмів контактної взаємодії елементів СЗМ систем. Числові результати, які отримано в роботі із використанням ПК SPACE-T, зіставлені із відомими числовими й експериментальними даними, що дозволило встановити ступень їхньої вірогідності. Порівняння чисельних результатів з отриманими аналітичними, експериментальними і чисельними даними, що отримано іншими авторами показали, що максимальні розбіжності для найбільш складних випадків не перевищували 15%. Це свідчить про достатньо добру ступінь достовірності щодо запропонованих в роботі методів, алгоритмів і програмного забезпечення.

6. Створені двовимірні й тривимірні СЕ моделі для розрахунку міцності і жорсткості проєктованих нових зубчастих передач з дрібно-дискретною зміною передатного відношення, які є відповідними СЗМ системам із плоскими несучими дисками зі спіральними пазами, корпусними дисками із радіальними пазами та просторовими рухливими зубами. За розрахунковими дослідженнями встановлено кількісні і якісні характеристики міцності і жорсткості та надано аналіз напружено-деформованого стану конструктивних елементів таких систем. Сформульовані рекомендації до оптимального проєктування несучих дисків зі спіральними пазами і корпусними дисками із радіальними пазами. На основі встановлених закономірностей деформування елементів варіаторів швидкості обґрунтовано рекомендації щодо їхнього проєктування.

7. Обґрунтовано нову методику для аналізу напружено-деформованого стану складених бандажних матриць (СБМ), які застосовують при холодному і напівгарячому видавлюванні вісесиметричних деталей. Створені СЕ моделі для цього класу СЗМ систем, що здатні моделювати складні механізми контактної взаємодії складових елементів таких

систем. Із використанням ПК SPACE-T проведено аналіз конструктивної міцності і жорсткості перспективних конструкцій СБМ. Надано практичні рекомендації по вибору раціональних кутів нахилу конусних поверхонь та параметрів охолодження для проєктованих СБМ. Обґрунтовано рекомендації до підвищення ефективності технології видавлювання, які були використані при створенні конструкторській документації по виготовленню складених конічних матриць - СБК-1, що застосовують при напівгарячому видавлюванні напівконічних втулок.

8. Для електромагнітних систем із плоскими та гвинтовими обмотками токамаків і торсатронів створені нові розрахункові схеми, що відповідають стрижневим моделям СЗМ систем. На цій основі виконані розрахунки міцності і жорсткості та надано аналіз напружено-деформованого стану їхніх неоднорідних багатокомпонентних елементів. Експериментально та на підставі числових досліджень встановлено кількісні та якісні закономірності деформування обмоток. Надано оцінки працездатності та обґрунтовані рекомендації до проєктування таких систем. Виконано розрахунки на міцність і жорсткість обмоток ЕМС проєктованих установок, зокрема, гвинтових обмоток торсатрона "Ураган-М" та D-образних плоских котушок токамака ТБ-0. Отримані результати використані для оцінювання проєктів двоступеневої гвинтової ЕМС - "Мікро – 100", обмотки тороїдального поля торсатрона та плоских котушок середньомасштабного токамака із локальним дивертором, перспективної серії міжнародного токамака ІНТОР.

9. Створено двовимірні та тривимірні СЕ моделі СЗМ систем, які відповідають індукторним системам із комбінованими шаровими матрицями, що складені із товстої діелектричної пластини та розташованій на неї сталевій накладці з малюнком для плоского магнітно-імпульсного штампування тонколистових електропровідних металевих заготовок. Теоретично та експериментально визначені розподіли магнітних тисків на тонколистові заготовки та шарові матриці. Вивчені закономірності електромагнітних і механічних процесів в технологічних системах "індуктор - заготовка - матриця", сформульовані та теоретично й експериментально обґрунтовані необхідні технологічні й конструктивні умови для ефективного здійснення магнітно-імпульсного штампування тонколистових металевих заготовок. На цій основі зроблено висновок про високу ефективність застосування комбінованих шарових матриць в магнітно-імпульсному штампуванні тонколистових електропровідних металевих заготовок. Достовірність висновків встановлено за даними експериментальних досліджень із штампуванням друкованих плат. Здійснено впровадження магнітно-імпульсного штампування рисунку в електропровідних елементах, що сприяло підвищенню якості виготовлення плат, які застосовують у зарядно-випрямних пристроях Д2-10М для мікрокалькуляторів "Електроніка".

10. Теоретичні, експериментальні і числові результати, які отримано в роботі, використано при виконанні держбюджетних тем за державними програмами в НТУ "ХП", впроваджено шляхом передачі ПК SPACE-T та теоретичних розробок або числових даних і рекомендацій, згідно із науково-технічними договорами з підприємствами та установами, та застосовуються в практиці проєктування на ДП "Завод ім. Малишева", у Національному



науковому центрі "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України, Інституті машин і систем НАН України (м. Харків), Інституті імпульсних процесів і технологій НАН України (м. Миколаїв).

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. -Харьков: НТУ "ХПИ". 2001, -273с. (монографія).  
Авторові належать метод розрахунку СЗМ систем при дії електромагнітного поля, усі теоретичні, чисельні результати розрахунків шарових комбінованих матриць, оцінки міцності індукторних систем, окремі експериментальні результати.
2. Быков В.Е., Георгиевский А.В., Корявко В.И., Погожев Д.П., Рарог М.Д., Смирнов В.Г., Бортовой В.В., Лавинский В.И., Хавин В.Л., Зайцев Б.Ф., Найденов Я.Б., Шергин С.Ю. Система тороидального магнитного поля с разъемными катушками крупного токамака// Вопросы атомной науки и техники. Термоядерный синтез. -М.: ИАЭ. – 1981. - Вып. 1(7). - С. 46-58.  
Авторові належить метод та результати розрахунку обмоток ЕМС тороїдального поля токамак ТБ-0 та окремі числові дані.
- 3.Лавинский В.И., Хавин В.Л., Шергин С.Ю. Исследование напряженно-деформированного состояния криволинейных плоских электромагнитов// Проблемы машиностроения. Респ. межвед. сборник науч. тр. -К.: Наукова думка. -1984, - Вып. 22. -С.60-65.  
Авторові належить метод розрахунку плоских обмоток ЕМС тороїдального поля токамака ТБ-0 та усі чисельні результати.
4. Бортовой В.В., Ингульцов С.В. Лавинский В.И., Литвиненко Ю.А., Огороков О.С., Шергин С.Ю. Исследование механической прочности электромагнитных обмоток термоядерных установок// Вопросы атомной науки и техники. Термоядерный синтез. -М.: ИАЭ. – 1984, -Вып. 4(17). -С.53-56.  
Авторові належить метод розрахунку просторових обмоток ЕМС торсатрона У-2М та надані числові результати.
- 5.Лавинский В.И., Шергин С.Ю. Об одной задаче оптимизации криволинейных неоднородных стержней// Динамика и прочность машин. Респ. межвед. н-т сборник. -Харьков: ХПИ. -1985. -№ 41. - С. 104-108.  
Авторові належить метод розрахунку, постановка задачі вагової оптимізації та числові результати.
- 6.Лавинский В.И., Шергин С.Ю. К вопросу о решении нелинейной краевой задачи, описывающей деформирование криволинейного стержня// Динамика и прочность машин. Респ. межвед. н-т сборник. -Харьков: ХПИ. -1985. -№ 46. - С. 98-101.  
Авторові належить метод розрахунку криволінійного стержня для лінеарізованої задачі, окремі числові результати.

- 7.Зубатый С.С., Лавинский В.И. Программное обеспечение для прочностного анализа контактирующих тел// Информационные системы. Сборник науч. тр. -Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. -1994.- Вып. 2. С. 61-64.  
Авторові належить метод розрахунку тривимірної контактної задачі, алгоритм розв'язання, окремі числові результати.
8. Егурнов О.Р., Зубатый С.С., Лавинский В.И. Прочностные и динамические характеристики основных элементов плоского зубчатого вариатора // Динамика и прочность машин. Респ. межвед. н-т сборник. -Харьков: ХГПУ. -1997. -№ 55. - С. 120-125.  
Авторові належить загальна ідея розрахункових досліджень, деякі наведені результати.
- 9.Зубатый С.С., Лавинский В.И. Анализ прочности элементов конического зацепления специального вида// Динамика и прочность машин. Респ. межвед. н-т сборник. -Харьков: ХГПУ.-1998. - №56. -С.60-63.  
Авторові належить метод розрахунку СЗМ систем щодо кіничного зубчастого зачеплення, усі числові результати та зроблено висновки.
- 10.Лавинский В.И. Вероятностный подход к оценке параметров магнитно-импульсной штамповки листовых металлов// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. -1998. - Вип. 25. -С.66-72.
- 11.Автономова Л.В., Лавинский В.И., Шергин С.Ю. Экспериментальное исследование распределения деформаций при чистом изгибе модели обмотки электрофизической установки// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. -1999. - Вип. 47. -С.47-49.  
Автором спроектовано експериментальне обладнання та виготовлені моделі зразків, розроблена методика проведення експериментів при згині та крученні, належать деякі експериментальні дані.
- 12.Автономова Л.В., Лавинский В.И., Шергин С.Ю. Об одном подходе к прочностному анализу электромагнитных систем крупных электрофизических установок// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. -1999. - Вип. 53. -С. 148-153.  
Авторові належить метод розрахунку плоских обмоток ЕМС електрофізичних установок, окремі результати числових досліджень.
- 13.Анохин О.О., Бондарь С.В., Зубатый С.С., Лавинский В.И. Влияние конструктивно-технологических особенностей на прочность составных бандажированных матриц для холодного выдавливания// Кузнечно-штамповочное производство. - Минск. -2000. - №1. -С.20-23.  
Авторові належить метод розрахунку вісесиметричних СЗМ систем, постановки контактної задачі, усі числові дані та висновки.
14. Бортовой В.В., Зубатый С.С., Лавинский В.И. Напряженно-деформированное состояние типового элемента комбинированной матрицы для магнитно-импульсной штамповки// Вісник Харківського державного політехнічного університету.- Харків: ХДПУ.-2000.- Вип. 79. -С.39-41.

Автором сформульовано задачу, відповідну розрахунку СЗМ систем із для багатошаровими комбінованими матрицями та усі числові результати.

15. Лавинский В.И. Обобщенная математическая модель комбинированной матрицы для магнитно-импульсной штамповки длинных полос в тонкостенном металле// Интегровані технології та енергозбереження. -Харків: ХДПУ. -2000. - №1. -С.70-78.

16. Бондарь С.В., Зубатый С.С., Лавинский В.И. Модель комбинированной матрицы для магнитно-импульсной штамповки элементов прямоугольной геометрии в тонкостенном металле// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків:ХДПУ.-2000.- Вип.100.-С.12-14.

Авторові належать теоретичні розробки щодо математичного формулювання розподілу електродинамічних сил, числові результати та висновки.

17. Бондарь С.В., Зубатый С.С., Киркач Б.Н., Лавинский В.И. Программный комплекс SPACE-T для решения термоупругопластических контактных задач// Динамика и прочность машин. Респ. межвед. н-т сборник. -Харьков: ХГПУ.-2000. - №57. -С.24-34.

Авторові належить проект ПК, створені алгоритми та програми для реалізації методу розрахунку, висновки стосовно застосуванню ПК.

18. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Противень А.С. Влияние частоты поля на механические процессы при магнитно-импульсной штамповке полос в тонкостенном металле// Резание и инструмент в технологических системах. Междун. н-т сборник. -Харьков: ХГПУ. -2000. -Вып. 56. С. 9-14.

Автором сформульовані задача визначення динамічного навантаження тонкої смуги при магнітно-імпульсному штампуванні, теоретичні результати.

19. Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Лавинский В.И., Противень А.С., Хищенко Л.Т., Черногор Т.Т. Экспериментальное исследование магнитно-импульсной штамповки печатных плат для компоновки электротехнических схем// Технічна електродинаміка. -К.: ІЕ НАНУ. -2000.-№3. С.7-9.

Автором спроектовано експериментальне обладнання для магнітно-імпульсного штампування зразків друкованих плат до Д2-10М, отримані окремі експериментальні та числові результати.

20. Лавинский В.И. Исследование прочности и жесткости структурно взаимосвязанных механических систем// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. -2000. - Вип. 116. -С.86-97.

21. Зубатый С.С., Лавинский В.И. Міцнісний аналіз елементів кіничного зубчастого зачеплення з дрібно-дискретною зміною передавального відношення// Машинознавство. - Львів. -2000.-№4-5,-С.53-58.

Авторові належить метод розрахунку СЗМС для кіничного зачеплення із дрібно-дискретною зміною передавального відношення, усі результати.

22. Лавинский В.И. Выбор параметров магнитно-импульсной штамповки тонких листовых материалов// Кузнечно-штамповочное производство. -Воронеж. -2000.-№8.-С.18-21.

23. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Противень А.С. Влияние частоты поля на механические процессы при магнитно-импульсной штамповке круглых отверстий в тонкостенном металле // Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. -2000. - Вип. 117. -С. 40-42.

Автором надана постановка задачі до визначення динамічного навантаження тонкої кругової пластини при штампуванні, теоретичні результати.

24. Бортовой В.В., Гарев О.Л., Гринев В.Б., Лавинский В.И., Хавин В.Л. Весовая оптимизация катушки электромагнитной системы установки ТБ – 0 // Докл. второй всесоюз. конференции по инж. проблемам термоядерных реакторов. -Том 2. -Ленинград: НИИЭФА. -1982. -С.265-274.

Авторові належить математичні постановки задач та метод розрахунку обмоток ЕМС, розв'язок задачі вагової оптимізації плоскої обмотки та чисельні результати.

25. Бортовой В.В., Зубатый С.С., Киркач Б.Н., Лавинский В.И. Применение программного комплекса FEM-3DZ для анализа взаимодействия упругих тел // R-функции в задачах математической физики и прикладной геометрии. Сб. научн. тр.–Харьков:ХГПУ.-1996. С.59-61.

Авторові належить метод розрахунку тривимірної контактної задачі теорії пружності, алгоритм її розв'язування, окремі числові результати.

26. Бондарь С., Зубатый С., Конохов В., Лавинский В. Программный комплекс SPACE-T и возможности его применения при анализе жесткости и прочности элементов теплоутилизационных установок // Энергосбережение. Информационно - аналитический вестник. -Харьков: -№7-8, -1999. С.24-27.

Автором належить математична постановка та метод розрахунку задачі з урахуванням теплових полів.

27. Зубатый С.С., Лавинский В.И. Методика прочностного анализа многопараметрических передач и вариаторов скорости / ХГПУ. -Харьков, -1996. -9с. -Рус. -Деп. в УкрІТЕІ, -№1-Ук96 від 01.10.-1996 // Анот. в ж. "Експресс-новини: наука, техніка, виробництво", -№21.-1996.

Автором надано методики розрахунку міцності зубчастих варіаторів, окремі числові результати.

28. Зубатый С.С., Ковалюх Р.В., Лавинский В.И. Несущая способность одного типа двухпараметрической цилиндрической передачи // Тр. V-международ. н-т конф. "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье ", - Ч.1. -Харьков: ХДПУ. -1997. С.103-105.

Авторові належать моделі СЗМ систем, метод розрахунку зубчастих передач, окремі числові результати.

29. Калнаус С.В., Лавинский В.И. Сопряжение полей температуры и деформации при распространении волны в термоупругом слое // Збірник наукових праць "Высокі технології в машинобудуванні". - Харьков: ХГПУ, -№ 1(3), -2000. -С.122-128.

Автором отримано формулювання задач розповсюдження плоскої хвилі деформацій в термопружньому шарі, деякі теоретичні результати.

30. Бондарь С.В., Зубатый С.С., Егурнов О.Р., Лавинский В.И. Магнитно-импульсная штамповка элементов прямоугольной геометрии в тонкостенном металле // Вісник інженерної академії України. К.:–2000.-спец. вып.-С.463-466.

Автором сформульовані задачі до розрахунку процесів при штампуванні прямокутних отворів в листовій заготовці, усі результати та висновки.

31. Лавинский В.И., Школьный С.М. Конечно-элементный прочностной анализ биметаллического индуктора для магнитно-импульсной штамповки // Вісник інж. академії України. -К.: -2001, -№3 (ч. 2). -С.86-89.

Авторові належить постановка задачі міцностного розрахунку для структурно зв'язаних моделей індукторної системи, окремі чисельні результати.

## АНОТАЦІЇ

**Лавінський В.І.** Методи розрахунку на міцність і жорсткість структурно зв'язаних механічних систем при електромагнітному і контактному навантаженнях. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2001.

У роботі на єдиній науково-методологічній основі створені ефективні методи аналізу міцності та жорсткості структурно зв'язаних механічних (СЗМ) і технологічних систем різної мірності при контактному й електромагнітному навантаженнях, що дозволило вирішити комплекс складних проблем проектування нової енергетичної і транспортної техніки, прогресивної технології магнітно-імпульсного штампування. Запропоновано нові математичні моделі і розрахункові схеми СЗМ систем, що адекватно описують конструктивні і технічні особливості складних об'єктів нової техніки. Дослідженні нові зубчасті варіатори швидкості, складені матриці для видавлювання, електромагнітні системи токамаків і торсатронів, індукторні системи для магнітно-імпульсного штампування. Нові розробки відрізняються від існуючих тим, що надають можливість уточненого врахування складних механізмів деформування таких систем. У комплексному дослідженні встановлено нові закономірності властивостей міцності і жорсткості СЗМ систем з елементами різної мірності при лінійним, нелінійно-пружним і конструктивно-нелінійним деформуваннях в умовах контактного й електромагнітного навантажень.

**Ключові слова:** структурно зв'язані механічні системи, метод скінченних елементів, міцність, жорсткість, контактна взаємодія, пружно-пластичне деформування, електромагнітне навантаження.

**Лавинский В.И.** Методы расчета на прочность и жесткость структурно связанных механических систем при электромагнитном и контактном нагружениях. - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.02.09 - динамика и прочность машин. - Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2001.

Диссертационная работа посвящена разработке методов расчетов на прочность и жесткость неоднородных структурно связанных механических (ССМ) систем, конструктивные элементы которых адекватно моделируются деформируемыми телами разной мерности при тепловом, электромагнитном и контактном нагружениях.

Актуальность темы диссертации определяется потребностью в создании новой техники и технологий, интересом многих научных школ в создании эффективных методов расчетов на прочность и жесткость объектов новой техники, обобщенных в работе в класс ССМ систем. В области динамики и прочности машин значительный научный и практический интерес представляют разработки в направлении создания новых эффективных методов решения пространственных контактных задач для деформирующихся тел сложной формы при действии на них тепловых и электромагнитных полей.

Впервые, на единой научно-методологической основе созданы эффективные, теоретически и экспериментально обоснованные методы для численного анализа прочности и жесткости структурно связанных механических и технологических систем разной мерности при контактном и электромагнитном нагружениях, что позволило решить комплекс сложных проблем проектирования новой энергетической и транспортной техники, создать образцы новых прогрессивных технологий магнитно-импульсной штамповки тонколистовых изделий.

Представлены математические постановки смешанных контактных задач для ССМ систем при физически - и конструктивно-нелинейном деформировании их элементов в условиях контактного, теплового и электромагнитного нагружения. На основе МКЭ созданы обобщенные математические модели таких систем. Разработаны методы и алгоритмы численного расчета на прочность и жесткость ССМ систем, в основу которых положены отличные от традиционных схемы применения МКЭ и метода ортогональной прогонки для решения сформулированных краевых задач, отвечающих рассмотренному в работе классу технических и технологических систем. Методы и алгоритмы реализованы в созданном в работе программном комплексе - ПК SPACE-T. Выполнены исследования по достоверности разработанных методов расчета и созданного в работе программного обеспечения. Решены плоские и пространственных контактные задачи, изучены вопросы сходимости приближенных решений в зависимости от степени дискретизации ССМ систем. Установлено удовлетворительное соответствие полученных результатов при их сравнении с известными в литературе аналитическими и экспериментальными данными.

Разработаны, теоретически и экспериментально обоснованы методики для оценки прочности и жесткости объектов новой техники на этапах их проектирования и создания.

На основе пространственных КЭ моделей ССМ систем с элементами разной мерыности в численных исследованиях установлены новые качественные и количественные закономерности свойств прочности и жесткости таких систем при линейном, нелинейно-упругом и конструктивно-нелинейном деформировании в условиях контактного и электромагнитного нагружения.

Рассмотрены новые конструкторские и технологические проекты, которые включают: проектирование зубчатых двухпараметрических передач с мелкодискретным изменением скорости, плоских и пространственных обмоток электромагнитных систем токамаков и торсатронов, создание составных бандажированных матриц для холодного и полугорячего выдавливания, индукторных систем для магнитно-импульсной штамповки тонколистовых электропроводящих заготовок. На основе совместного анализа электромагнитных и механических процессов в технологических системах "индуктор - заготовка - матрица" сформулированы, теоретически и экспериментально обоснованы необходимые технологические и конструктивные условия для эффективной магнитно-импульсной штамповки тонких металлических заготовок.

Созданные в работе методы, алгоритмы и программные разработки составляют новую расчетную базу для анализа прочности и жесткости ССМ систем при их контактом, электромагнитном и тепловом нагружениях, что имеет существенное прикладное значение. На этой основе можно осуществлять расчеты сложных объектов новой техники и технологического оснащения на этапах их проектирования, создания и доводки. Эти разработки использованы в научных исследованиях и внедрены в практику предприятий Украины. Теоретические и программные разработки используются в учебном процессе НТУ "ХПИ".

**Ключевые слова:** прочность, жесткость, контактное взаимодействие, упругопластическое деформирование, структурно связанные механические системы, электромагнитное нагружение.

*Lavinsky V.I.* The strength and hardness analysis methods for structurally connected mechanics systems during electrical magnetic and contact loading. –Manuscript.

Thesis for a Doctor's degree by speciality 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines. - National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, 2001.

On the united science methodological base effective methods for the strength and hardness analysis of the structurally connected mechanics systems what have different mechanical strength during electrical magnetic and contact loading are created. It permits solving the complex problems of designing new techniques and elaborating advanced magnetic pulse stamping technology.

The new speed teeth variators, the matrix for pressing, the magnetic systems for tocamacs and torsatrons, the inductors for magnetic pulse stamping were investigated and designed.

As a result of complex investigations some new particularities were fixed of strength properties and hardness for the structurally connected mechanical systems during the linear, non-linear elastic and constructively non-linear deforming under conditions of the contact and electrical magnetic loading.

**Key words:** structurally connected mechanical systems, analysis calculation method, strength, hardness, contact interaction, elastic plastic deforming, electrical magnetic loading.

Автор висловлює щирю подяку науковому консультантові Морачковському Олегу Костянтиновичу, доктору технічних наук, професору, завідувачу кафедрою теоретичної механіки НТУ "ХПІ" за надані консультації при створенні і розвитку наукового напрямку за темою роботи та корисні поради при написанні роботи.

Лавінський Володимир Іванович

**Методи розрахунку на міцність і жорсткість структурно зв'язаних механічних систем при електромагнітному і контактному навантаженнях**

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Спеціальність 05.02.09 - Динаміка та міцність машин

Відповідальний за випуск - к.т.н. доц. Хавін Валерій Львович



Підп. до друку 27.11.2001р. Формат видання 145×215  
Формат паперу 60×90/16. Папір Могра. Друк.- ризографія .  
Обсяг 1,9 аркушів. Тираж 100. Зам. №366.

---

Видавничий центр НТУ "ХПІ". Свідоцтво ДК 116 від 10.07.2000р.  
Друкарня НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Фрунзе,21

---