

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Лавінський Денис Володимирович

УДК 539.3

**РІШЕННЯ КОНТАКТНИХ І ТЕМПЕРАТУРНИХ
ЗАДАЧ МІЦНОСТІ ДЛЯ СКЛАДЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОСНАЩЕННЯ**

Спеціальність 05.02.09 - динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2004

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент,
Бортовой Вадим Васильович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"
професор кафедри опору матеріалів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Курпа Лідія Василівна,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"
Міністерства освіти і науки України, м. Харків,
завідувач кафедри прикладної математики.

кандидат технічних наук, ст. н. с.

Зайцев Борис Пилипович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків,
старший науковий співробітник відділу вібраційних і
термоміцностних досліджень.

Провідна установа: Національний технічний університет
"Київський політехнічний інститут"
Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться 14.04. 2004 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої 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".

Автореферат розісланий 09.03.2004р.

В.О. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради

Жовдак В.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний розвиток машинобудування відбувається із застосуванням ефективних технологій, які дозволяють створити економічні, енергозберігаючі та екологічні виробництва і підвищити продуктивність праці. У проектуванні нових технологічних систем та при удосконаленні існуючого обробного устаткування переважно застосовують безвідходні технології. В обробці металів тиском до таких технологій належать технології холодного й напівгарячого видавлювання (НГВ) та магнітно-імпульсного штампування (МІШ) металів. Технологічні процеси у таких технологіях засновані на використанні пластичних властивостей матеріалів та нетрадиційних енергетичних джерел.

У проектуванні технологічних систем важливе місце належить розрахункам на міцність і жорсткість технологічного оснащення, серед якого найбільш поширені складені конструкції з елементами, що мають різну форму і матеріальні властивості та піддані дії інтенсивних зовнішніх полів різної фізичної природи за умов експлуатації при здійсненні операцій в технологічному циклі.

Результати розрахунків на міцність складених конструкцій технологічного оснащення суттєво залежать від ступеню адекватності моделювання їхнього деформування, що здійснюють за рахунок прийняття математичної постановки нелінійних контактних і температурних задач механіки, а також від точності розв'язування цих задач.

До теперішнього часу залишаються актуальними рішення проблем міцності складених конструкцій технологічного оснащення на базі методів, які більш ефективні ніж існуючі та здатні розв'язувати теплові та контактні задачі нелінійного деформування тіл із врахуванням складної геометрії взаємодіючих тіл, попередніх натягів та зазорів, різних механізмів тертя в зонах контакту, нерівномірності температури при дії інтенсивних зовнішніх силових та теплових полів. Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною як в науковому, так й практичному відношенні, має важливе значення при створенні нових видів технологічного оснащення для сучасних технологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, проведені в дисертаційній роботі, виконані на кафедрі опору матеріалів Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” (НТУ "ХПІ") у термін з 2000 р. по 2003 р., відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України за координаційним планом "Високоєфективні технологічні процеси в машинобудуванні" по темах: "Розробка методики розрахунку та дослідження напружено-деформованого стану обладнання для магнітно-імпульсного штампування тонких металів" (№ДР 0100U001677); "Розробка наукових основ розрахунку та оптимізації мікро

електромеханічних систем (МЕМС)" (№ДР 0100U001676); "Дослідження та оптимізація мехатронічних систем, що самоконтролюються та самокеруються, на базі МЕМС" (№ДР 0103U001487).

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи є створення на базі методу скінченних елементів (МСЕ) теоретично й експериментально обґрунтованого методу для розв'язування нелінійних контактних і температурних задач пружно-пластичного деформування складених конструкцій та рішення на цій основі задач міцності технологічного оснащення для НГВ та МШ, що проєктуються для впровадження на машинобудівних підприємствах. Для досягнення цієї мети в роботі вирішені наступні задачі.*

- Надані математичні постановки та запропоновано на базі МСЕ метод розв'язування температурних задач для складених конструкцій технологічного оснащення НГВ з осьовою симетрією із урахуванням щільностей внутрішніх джерел тепловиділення при терті в зоні контакту й пластичному деформуванні заготовки, конвективному теплообміні і температури зовнішнього середовища.

- Запропоновані математичні постановки та на базі МСЕ надано ефективний метод розв'язування змішаних контактних задач пружно-пластичного деформування елементів складених конструкцій з осьовою симетрією при інтенсивному тепловому та силовому навантаженнях.

- Здійснені чисельні дослідження щодо встановлення ступеню достовірності методів та програмних розробок, які створені для розв'язування температурних та контактних задач для складених конструкцій з осьовою симетрією.

- Створено узагальнену математичну модель термопружно-пластичного нелінійного деформування складених бандажованих матриць для ХВ та НГВ, що відповідають проєктним технологічним системам для виготовлення циліндрово-конічних втулок.

- Отримані рішення щодо проблем теплової та контактної міцності проєктованих складених бандажованих матриць для виготовлення циліндрово-конічних втулок за технологією НГВ та визначені якісні і кількісні закономірності впливу на міцність і жорсткість таких систем фізико-механічних властивостей матеріалів і геометричних форм та механізмів контактної взаємодії елементів матриць, рівнів зовнішніх силових і теплових полів при здійсненні операцій технологічного циклу виробництва деталей.

- Створено математичну модель індукторних систем магнітно-імпульсної "роздачі" циліндричних тонкостінних заготовок по технології МШ, що відповідають проєктним технологічним системам.

- Отримані рішення задач електродинаміки щодо визначення магнітного тиску та контактної міцності і жорсткості системи "заготовка – матриця" при роздачі тонкостінних циліндричних заготовок та експериментально і теоре-

тично обґрунтовані пропозиції по створенню нових видів технологічного оснащення МШ тонкостінних заготовок.

Об'єктом дослідження є механічні і технологічні системи, що відповідають бандажованим складеним матрицям для напівгарячого видавлювання (НГВ) вісесиметричних тіл, індукторним системам для МШ.

Предметом дослідження є міцність і жорсткість технологічного оснащення при теплових і контактних навантаженнях, що відповідають розрахунковим схемам об'єктів досліджень.

Методи дослідження складають комплекс чисельних методів теорії пружності і пластичності на базі МСЕ, математичного моделювання навантаження і напружено-деформованого стану.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- Надано розвиток методам рішення проблем міцності та жорсткості складених конструкцій технологічного оснащення, із врахуванням критеріїв працездатності, за рахунок створеного на базі МСЕ нового методу розв'язування температурних і нелінійних змішаних контактних задач термопружно-пластичного деформування складених конструкцій з осьовою симетрією при сумісній дії інтенсивних теплових та силових полів різної фізичної природи.

- Створені нові математичні моделі складених конструкцій технологічного оснащення, що відповідають моделям нових видів складених бандажованих матриць для НГВ і технологічних систем для МШ, які відрізняються від існуючих тим, що дозволяють виконати уточнений аналіз термопружно-пластичного деформування складених конструкцій при контактній взаємодії.

- Отримані нові якісні і кількісні закономірності міцності і жорсткості складених бандажованих матриць для НГВ за рахунок уперше здійсненого їхнього аналізу при сумісній дії теплового і контактного навантаження в технологічному циклі.

- Уперше отримано рішення задачі міцності і жорсткості системи “заготовка – матриця” для “роздачі” циліндричних тонкостінних заготовок на основі запропонованої вісесиметричної моделі складеної конструкції технологічного оснащення для МШ.

Обґрунтованість, вірогідність наукових положень, висновків і основних результатів підтверджено дослідженнями внутрішньої збіжності чисельних розв'язків при зміні ступеня дискретизації складених конструкцій, задовільним збігом розрахункових даних, отриманих за допомогою створених методів і програмних засобів розрахунку, з відомими аналітичними результатами і даними лабораторних експериментальних досліджень.

Практичне значення одержаних результатів. Створені в роботі методи, алгоритми і програмне забезпечення поширюють розрахункову базу для

аналізу міцності і жорсткості складених вісесиметричних тіл з урахуванням термомеханічних явищ в областях контакту. На цій основі можна проводити розрахунки для отримання характеристик міцності і жорсткості складних елементів нового технологічного оснащення для прогресивних технологій на етапах проектування індукторних систем магнітно-імпульсного штампування тонкостінних циліндричних зразків. Результати роботи в частині розрахунку складених бандажованих матриць для напівгарячого видавлювання використані при проектуванні нових технологічних процесів на ДП "Завод ім. Малишева" (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що надані в дисертації, отримані здобувачем особисто. Метод розв'язування температурних і нелінійних змішаних контактних задач термопружно-пластичного деформування та рішення проблем міцності, із врахуванням критеріїв працездатності, складених конструкцій технологічного оснащення одержані особисто здобувачем. Математичне моделювання складених бандажованих матриць для напівгарячого видавлювання, а також системи "заготовка – матриця" для магнітно-імпульсного штампування металів виконано здобувачем особисто. Висновки та рекомендації в роботі, які зроблені за аналізом розрахункових та експериментальних даних, належать особисто здобувачеві. Розрахунки з електродинаміки для визначення магнітного тиску в системах МІШ обговорювалися з доктором технічних наук, професором Батигінім Ю.В. (НТУ "ХП").

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи обговорювалися на наукових конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'я", Харків – Мишкольц, 2001, 2002р.р.; Міжнародній конференції "Актуальні проблеми механіки оболонок", Казань, 2000р.; II і V Міжнародних науково-технічних конференціях "Фізичні і комп'ютерні технології в народному господарстві", Харків, 2001, 2002р.р.

Публікації. За результатами досліджень, що наведено у дисертації, опубліковано 11 наукових праць, з яких 6 статей - у фахових виданнях за переліком ВАК України, 3 доповіді - у збірниках наукових праць міжнародних конференцій і 2 тези доповідей.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків і 1 додатка. Повний обсяг роботи складає 145 сторінок, з них 43 ілюстрації по тексту; 3 таблиці по тексту; 1 додаток на 3 сторінках та 101 найменування використаних літературних джерел на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та предмет дослідження, показано новизну та достовірність наукових результа-

тів та їх практичне значення, приведено інформацію про апробацію роботи та публікації основних результатів.

У першому розділі досліджено сучасний стан та проаналізовано технологічні процеси обробки металів тиском (ОМТ) та магнітно-імпульсного штампування (МІШ) металів, які часто застосовуються в різних галузях машинобудування. Надано огляд робіт по проектуванню технологічного оснащення в обробці металів тиском, включно тих, де розглядаються рішення проблем міцності та жорсткості складених конструкцій технологічного оснащення, а також робіт, які присвячені методам розв'язування температурних та контактних задач пружного та пружно-пластичного деформування. Обґрунтовано вибір напрямків нових досліджень за темою роботи.

У сучасних технологіях обробки металів найбільш поширені традиційні методи, серед яких до ефективних і ресурсозберігаючих відносяться холодне й напівгаряче видавлювання (ХВ і НГВ). На шляху широкого впровадження цих технологічних процесів, особливо при обробці деталей з важко деформуючих металів, виникають проблеми, які пов'язані з недостатньою міцністю і надійністю елементів оснащення. Ці проблеми вирішують за рахунок створення більш ефективних ніж існуючі чисельних методів щодо розв'язування теплових та контактних задач нелінійного деформування тіл із врахуванням їх складної геометрії, попередніх натягів та зазорів, різних механізмів тертя в зонах контакту, нерівномірності температури при дії інтенсивних зовнішніх силових та теплових полів. Адекватні моделі матриць і пуансонів та уточнений аналіз міцності цих моделей дозволяє створювати компактні, надійні і високостійкі штампи, ще на етапі проектування.

Центральним питанням при розробці методів аналізу міцності і жорсткості складених конструкцій технологічного оснащення, до яких відносяться технологічні системи ОМТ і МІШ, є питання надійного моделювання складних ефектів контактної взаємодії елементів систем. В літературі є добре відомими методи розв'язання контактних задач теорії пружності. Історично першими є дослідження Герца, в яких були отримані місцеві напруження в зоні локального контакту пружних тіл. Величезний внесок у розвиток аналітичних і чисельних методів розв'язання контактних задач механіки внесли вчені: М. П. Векуа і М. Векуа, Л. О. Галін, Н. Губер, Б.Я. Кантор, Г.І. Львов, Р. Д. Міндлін, С. Г. Міхлін, М. І. Мусхелішвілі, В.Л. Рвачев, К.М. Рудаков, Д. І. Шерман, І. Я. Штаєрман та інші.

Розроблені аналітичні методи досить важко пристосувати до розрахунку реальних конструкцій, елементи яких мають складну геометрією та зазвичай контактують за некласичними умовами контакту. Тому, як свідчить аналіз сучасної бібліографії, для розв'язання мішаних контактних задач перспективними є чисельні методи, насамперед ті, що основані на схемах МСЕ. Існує ряд підходів щодо розв'язування змішаних контактних задач на базі

МСЕ, однак, як показав огляд літератури, найбільш ефективним є підхід із введенням в зони контакту так званих контактних скінченних елементів (КСЕ) із спеціальними механічними властивостями.

В огляді літератури надано аналіз методів для розв'язування термопружно-пластичних контактних задач. Для такого класу задач в роботах проф. Рудакова К.М. запропоновано метод сполучень, за яким точність розв'язків залежить від вибору параметрів збіжності ітераційного процесу. У цих дослідженнях визначено, що у сіткових методах для випадку прослизання контактуючих тіл в зонах контакту порушуються вимоги щодо узгодження вузлів сітки, що приводить до необхідності коректувати вузли сіткової моделі. Це свідчить про ефективність введення спеціального контактного шару.

Відомі на теперішній час аналітичні методи є практично непридатними для застосування у розрахунках матриць ХВ і НГВ, які є основними елементами штампу, у зв'язку з неадекватністю припущень та складнощами математичного апарату. Реальні матриці є складеними конструкціями, форма елементів яких відрізняється від канонічних циліндричних чи сферичних. З появою чисельних методів, серед яких найбільш розповсюдженим є МСЕ, стало можливим здійснити більш точний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) елементів конструкцій технологічних систем. Існує багато закордонних (К. Ланге, Г.Ю. Висмаер) і вітчизняних (О.А. Ганаго, В.Л. Марченко, В.В. Ковтун, В.В. Торяник) публікацій, у яких авторами проведені розрахунки НДС складених матриць за допомогою МСЕ, визначені оптимальні значення натягів та інше. Нажаль, ці розробки не мають загального характеру і не враховують суттєвого фактору - однобічність контакту між елементами матриць. В існуючих розрахунках матриць для НГВ не враховують нерівномірного розподілу температури внаслідок внутрішніх джерел тепловіділення при терті в зоні контакту й пластичному деформуванні заготовки, конвективному теплообміні і температури зовнішнього середовища.

Перспективні методи обробки металів на базі магнітно-імпульсного штампування відносяться до передових і сучасних імпульсних технологій, що використовують ефекти взаємодії магнітного поля з добре провідними металами. Тиск на заготовку, яка оброблюється, створює магнітно-імпульсне поле при розряді ємнісного накопичувача в ланцюзі магнітно-імпульсної установки (МІУ), що для здійснення деформування трубчастих заготовок містить робочий інструмент - індуктор у виді солоноїда з одним чи багатьма вітками. При створенні технологічного обладнання МІШ, що реалізують процеси магнітно-імпульсного штампування, на етапі проектування таких систем вирішуються електродинамічні проблеми з вибором електротехнічних параметрів системи та проблеми міцності елементів систем "індуктор – заготовка – матриця", із врахуванням критеріїв працездатності. Нажаль, в існуючій науковій літературі практично відсутні роботи, у яких містяться рішення цих проблем.

В цьому розділі надано оцінку стану проблем по темі роботи, що дозволило сформулювати за науковим напрямком у галузі динаміки та міцності машин нові завдання по темі роботи, які містять рішення контактних і температурних задач міцності для технологічного оснащення ХВ, НГВ та для МШ тонкостінних заготовок, що є важливим і актуальним для сучасного машинобудування.

У другому розділі надано загальну математичну постановку задачі термопружно-пластичного контактного деформування стосовно складених конструкцій, коли геометрія й умови навантаження задовольняють умовам осьової симетрії. Для розрахунків на міцність і жорсткість складених конструкцій застосовувався МСЕ у рамках методу перемінних параметрів пружності для лінеаризації задачі.

Одним зі складових загального навантаження складених конструкцій технологічного оснащення є змінне температурне поле. В розділі розглянуто розв'язання задачі стаціонарної теплопровідності, що застосовується при оцінці усталеного температурного навантаження, відповідно до процесів НГВ. Розв'язання задачі стаціонарної теплопровідності зведено до пошуку мінімуму функціоналу:

$$I = \iint_S \left\{ \frac{K}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] - Q_{r,z} \bar{T}_{r,z} \right\} r dS + \int_{L_2} q_{r,z} \bar{T}_{r,z} r dL + \int_{L_3} \frac{\alpha}{2} T_{r,z}^2 - 2T_\infty T_{r,z} r dL, \quad (1)$$

де $T(r,z)$ – функція розподілу температури, $Q(r,z)$ – щільність внутрішніх джерел тепловиділення, що визначається через роботу пластичного деформування заготовки і вихід тепла при терті, $q(r,z)$ – щільність потоку через границю L_2 , α – коефіцієнт конвективного теплообміну через границю L_3 , T_∞ – температура зовнішнього середовища.

На границі L_4 між окремими частинами S_i , S_j області прийняті умови ідеального теплового контакту (граничні умови 4-го роду):

$$\begin{cases} T_i(r,z \in L_4) = T_j(r,z \in L_4) \\ K_{S_i} \left(\frac{\partial T_i}{\partial r} \bar{l}_r + \frac{\partial T_i}{\partial z} \bar{l}_z \right) = K_{S_j} \left(\frac{\partial T_j}{\partial r} \bar{l}_r + \frac{\partial T_j}{\partial z} \bar{l}_z \right) \end{cases} \quad (2)$$

де $T_i(r,z \in L_4)$, $T_j(r,z \in L_4)$ – температура складових частин S_i , S_j на границі контакту, $K(S_i)$, $K(S_j)$ – коефіцієнти теплопровідності кожної частини, \bar{l}_r, \bar{l}_z – направляючі косинуси загальної нормалі до границі контакту.

Далі розглянуто постановку задачі термопружнопластичного деформування вісесиметричної складеної конструкції, яка моделюється об'єднанням n контактуючих вісесиметричних тіл, напружений стан яких при відсут-

ності об'ємних навантажень визначається з диференціальних рівнянь рівноваги виду:

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad (3)$$

а умови на відповідних поверхнях L_p прийняті у виді:

$$\sigma_{ij}n_j = p_{in}, \quad \forall x \in L_p. \quad (4)$$

У загальному випадку, для точок, що належать контактним поверхням, умови сполучення сформульовані нерівностями:

$$u_n^{m-1} + u_n^{m+1} - \delta_{on}^m \leq 0, \quad \sigma_{nn}^m \leq 0, \quad (5)$$

де $u_n^{m-1}, u_n^{m+1}, \delta_{on}^m$ - нормальні переміщення точок поверхонь контактуючих областей і початковий зазор (натяг), σ_{nn}^m - нормальні напруження на контактуючих поверхнях. Перша умова в (5) фізично означає "не проникнення" контактуючих тіл. При виборі зазору, між тілами виникає контактний тиск.

Механізми контактної взаємодії між відповідними точками контактуючих поверхонь областей в роботі моделювались шляхом введення контактного шару зі спеціальними властивостями. У межах можливої області контакту цей шар наділено спеціальними властивостями, що дозволяє "зовнішню нелінійність", обумовлену умовами (5), звести до "внутрішньої нелінійності" контактної області і розглянути взаємодію тіл, розділених шаром з відомими нелінійними властивостями. За допомогою описаного моделювання можна відбити такі механізми взаємодії контактуючих тіл, як зчеплення, прослизання, сухе тертя й інше. У роботі умови фрикційної взаємодії прийняті у формі законів Кулона або Зібеля в залежності від типу можливого контакту.

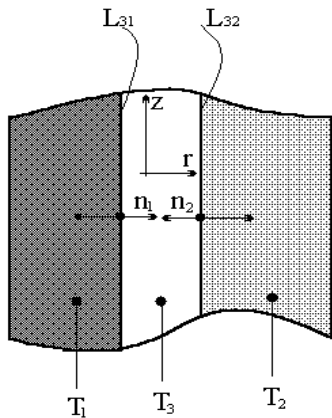


Рис.1. Модель контактної області для задачі теплопровідності

При розв'язанні задачі теплопровідності тепловий контакт моделювався шляхом введення спеціальних "контактних теплових" шарів з заданими теплофізичними властивостями. У цьому випадку в розрахунковій схемі між двома основними тілами введено ідеалізований прошарок (рис.1). У цьому випадку умови ідеального теплового контакту (2) набувають наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 \text{ , } z \in L_{31} = T_3 \text{ , } z \in L_{31} = T_3 \text{ , } z \in L_{32} = T_2 \text{ , } z \in L_{32} ; \\ K_{r1} \frac{\partial T_1 \text{ , } z \in L_{31}}{\partial r} = K_{r3} \frac{\partial T_3 \text{ , } z \in L_{31}}{\partial r} ; \\ K_{r3} \frac{\partial T_3 \text{ , } z \in L_{32}}{\partial r} = K_{r2} \frac{\partial T_2 \text{ , } z \in L_{32}}{\partial r} . \end{array} \right. \quad (6)$$

Умови (6) конкретизовані за рахунок вибору теплофізичних параметрів контактної сфери, який прийнято “прозорим” для розповсюдження тепла в радіальному напрямку й абсолютно “непрозорим” в осьовому напрямку. В чисельних дослідженнях умови (6) виконувалися, коли коефіцієнт теплопровідності контактної сфери приймався в десять разів більшим ніж коефіцієнт теплопровідності матеріалу тіл, що контактують.

Узагальнені рівняння стану, що встановлюють зв'язок між напруженнями і деформаціями в точках деформуючих тіл, представлені тензорно-лінійними співвідношеннями виду:

$$\varepsilon_{ij} = A_{ijkl} \sigma_{kl} + \alpha_{ij} \Delta T , \quad (7)$$

де A_{ijkl} - компоненти тензора, прийнятого для опису властивостей матеріалу, α_{ij} - компоненти тензора температурного розширення матеріалу.

У межах лінійної пружності матеріалу, співвідношення (7) відповідають узагальненому закону Гука. Для пружно-пластичного деформування при простому навантаженні та при розгляді малих пластичних деформацій, співвідношення (7) відповідають деформаційній теорії малих пружно-пластичних деформацій Ілюшина у формі змінних параметрів пружності з тензором матеріальних постійних:

$$A_{ijkl} = \frac{1}{E_*} (1 + \nu_*) \delta_{ik} \delta_{jl} - \nu_* \delta_{ij} \delta_{kl} , \quad (8)$$

де E_* , ν_* - змінні параметри пружності, які визначаються через інтенсивності напружень і деформацій, відповідно до діаграми деформування матеріалу.

Далі в цьому розділі розглянуто варіаційний принцип Лагранжа, побудована скінченно - елементна (СЕ) схема задачі. За базовий скінчений елемент (СЕ) прийнято чотирьох вузловий ізопараметричний СЕ із білінійною апроксимацією температури і переміщень. Методика рішення сформульованої вище термопружнопластичної контактної задачі побудована в рамках єдиної ітераційної схеми. З цією метою в роботі прийняті покрокове навантаження й ітераційна схема, що узагальнює відомий метод перемінних параметрів пружності для рішення термопружнопластичних задач. На кожному кроці лінеаризована система рівнянь МСЕ має вигляд:

$$[K]_{N-1} U_N = F - F_{N-1}^{\text{темп}} , \quad (9)$$

де N - номер ітерації, $[K]$ - глобальна матриця змінної жорсткості СЕ моделі, $\{U\}$ - вектор вузлових переміщень СЕ моделі, $\{F\}$, $F^{\text{темп}}$ - вектори зовнішніх і температурних навантажень, які приведені до вузлів СЕ сітки.

Ітераційний процес по визначенню зон пластичності, ділянок контакту та відриву продовжується до виконання умови досягнення відповідної точності, що попередньо задається. Запропонований метод реалізований у програмному модулі для програмного комплексу SPACE-T. Далі в розділі розглянуті тестові приклади, за вирішенням яких встановлена ступень вірогідності запропонованого в роботі методу розв'язання температурних і контактних задач міцності і жорсткості складених конструкцій.

У третьому розділі наведені рішення контактних і температурних задач міцності складених бандажованих матриць для НГВ циліндро-конічних втулок.

Розрахункова схема матриці у вигляді SE моделі надана на рис.2. У розрахунках матриці моделювались набором вісесиметричних тіл з циліндричними та конічними поверхнями. Між елементами матриць враховані

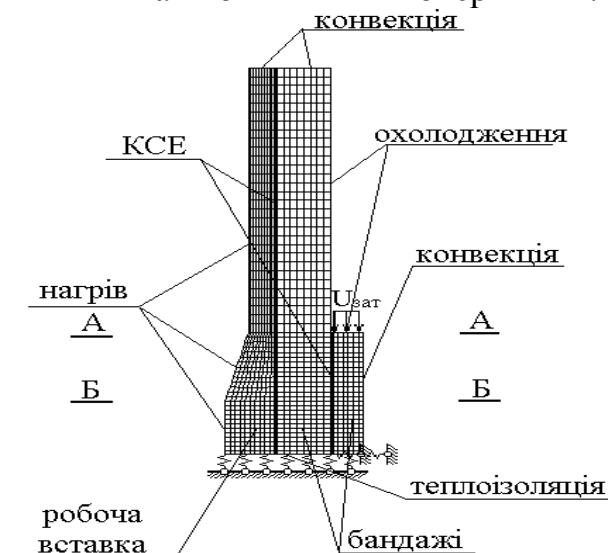


Рис.2. SE модель складеної матриці

умови однобічного контакту, а також пружне обпирання нижніх торців робочої вставки та внутрішнього бандажу і жорстке закріплення нижнього торцю зовнішнього бандажу. У розрахунках враховано попередній натяг, шляхом завдання переміщень ($U_{зат}$) верхнього торця зовнішнього бандажу. У SE моделі представлені усі основні складові, притаманні великому класу складених матриць: робоча вставка і бандажі, які прийняті двомірними.

Умови однобічного контакту тіл конкретизовані шляхом введення шарів контактних скінченних елементів (КСЕ), якими моделювались натяг між складовими матриці та тертя за законом Кулона. У розрахунках видавлювання заготовки навантаження на заготовку моделювалось шляхом введення переміщень її верхнього торця, а тертя між заготовкою і робочою вставкою моделювалось за законом Зібеля. На рис.2 наведені перерізи А-А та Б-Б, у яких інтенсивності напружень є найбільшими.

Розрахунки міцності матриць проведені з урахуванням нерівномірного температурного поля. Розглядалися різні закони розподілу температури, які відповідали початку процесу видавлювання та усталеним температурним режимам видавлювання. Температурне поле на усталених режимах визначалось шляхом розв'язання задачі стаціонарної теплопровідності. Виявилось, що на початку процесу видавлювання інтенсивність напружень у небезпечних перерізах значно нижче, ніж у подальшому робочому циклі видавлювання на усталених температурних режимах. Аналіз НДС виявив наступні закономір-

ності. У точці контакту верхнього торця зовнішнього бандажа з внутрішнім знаходиться зона концентрації напружень. Радіальні переміщення внутрішньої поверхні робочої вставки, обумовлені нагріванням в області верхнього торця, досить значні і за певних умов можуть перевищити припустимі. З метою з'ясування можливих варіантів зниження величини радіальних переміщень робочої вставки був проведений ряд розрахунків, у яких варіювалися температура охолодження і величина зовнішнього бандажа. Проведені розрахунки дозволяють визначити, що при температурі охолоджувальної рідини порядку 298 – 303°K, максимальні переміщення не перевищують припустимі для технологічного відхилення радіальних розмірів. При збільшенні висоти зовнішнього бандажа розрахункові результати свідчать про невисоку ефективність цього прийому. Це зв'язано з тим, що максимальні переміщення значно (приблизно на 30 %) зменшуються практично при досягненні висоти зовнішнього бандажа загальної висоти матриці. При цьому виникнуть проблеми конструктивного характеру, зв'язані з кріпленням “високого” бандажа. Відзначимо, що у випадку гранично високого бандажа на 25 % зростає максимальна інтенсивність напружень, що відповідає, як жорсткості конструкції, так і збільшенню перепаду температури по товщині матриці.

Подальші розрахунки НДС складеної матриці проводилися разом з деформуємою заготовкою. З метою усунення концентратора розглядався варіант матриці, у якій висота зовнішнього бандажа свідомо вище лінії дії максимального навантаження на робочу поверхню. Відповідно до розрахункових даних по розподілу інтенсивності, у зазначеному перетині зменшення інтенсивності напружень у зоні концентратора склало приблизно 40 %. Отже, одна з загальних рекомендацій із проектування матриць подібного класу полягає в можливо більш гладкій конструктивній формі елементів бандажа. Варто передбачити переміщення вихідних геометричних концентраторів напружень вище відповідних зон дії максимального навантаження на матрицю.

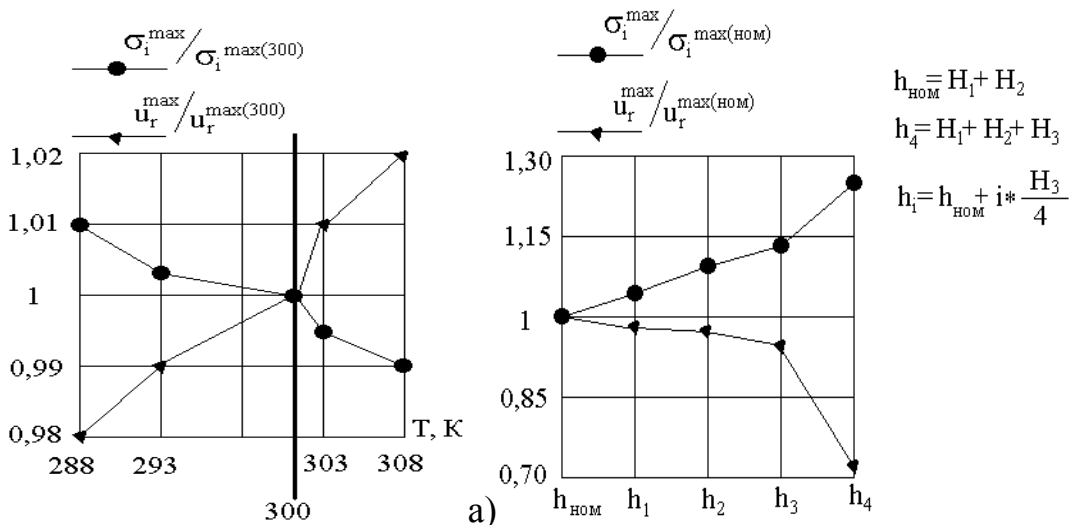


Рис. 3. Максимальні радіальні переміщення робочої вставки і інтенсивності напружень від температури охолодження (а), висоти зовнішнього бандажу (б)

У четвертому розділі наведені результати досліджень по розробці умов досягнення технологічності операції магнітно-імпульсної “роздачі” для формування окружних гофрів на тонкостінному циліндрі.

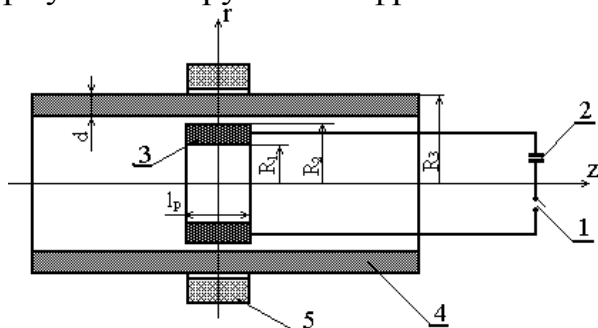


Рис.4. Модель індуктора для роздачі циліндричної труби: 1–комутатор; 2–накопичувач; 3–індуктор; 4–заготовка; 5 – матриця

Схема операції “роздача” показана на рис.4. При замиканні комутатора – 1 відбувається розряд ємнісного накопичувача – 2 на одновитковий індуктор – 3. Порушене магнітне поле, взаємодіючи з вихровими струмами в стінках металеві труби – 4, створює в робочій зоні індуктора могутній локальний тиск, під дією якого відбувається роздача за формою зовнішньої матриці – 5.

При розробці технологічних операцій МШ загальна задача може бути розділена на дві незалежні: “електромагнітну” і “механічну”. У рамках першої зважається, зокрема, питання розрахунку рівнів магнітних тисків. У рамках другої зважаються питання міцності і жорсткості матриці, поведіння матеріалу заготовки при деформуванні, перевіряється забезпечення умов технологічної операції виникаючим магнітним тиском.

Перш ніж досліджувати НДС заготовки і матриці були розглянуті електромагнітні процеси, що відбуваються в індукторних системах при “роздачі”. Розгляд електромагнітних процесів необхідний для винайдення формул напруженості магнітного поля у заготовці, за допомогою якої можна винайти магнітний тиск, що діє на заготовку по наступній залежності:

$$p = \frac{\mu_0}{2} (H_1^2 - H_2^2), \quad (12)$$

де H_1 , H_2 – напруженості на граничних поверхнях заготовки, які були винайдені із розв’язку фундаментальної системи рівнянь Максвелла. Ці рівняння були розв’язані у припущеннях вісєвої симетрії, тонкостінності заготовки та квазістаціонарності процесу. На рис.5 наведені розрахункові дані по розподілу магнітного тиску вздовж поверхні циліндричної заготовки для двох типів індукторів.

Далі на базі знайдених розподілів магнітного тиску були вирішені задачі, які стосуються дослідження НДС системи “заготовка – матриця” при одержанні двох окружних гофрів на тонкостінному циліндрі. За розрахункову схему була прийнята система із тонкостінного циліндра і двох кілець. Метою аналізу було знаходження конструкційних параметрів, за яких умови досягнення мети технологічної операції виконуються найкращим способом. Ма-

лось на увазі, що у матриці інтенсивність напружень не повинна перевищити межу текучості, а у заготовці максимальні напруження повинні виникати в зоні контакту із матрицею. За для цього варіювалися умови закріплення заготовки (жорстке защемлення чи вільне обпирання торців), просторовий розподіл магнітного тиску (рівномірно уздовж поверхні циліндру чи локально в зоні матриць) та форма перерізу матриці.

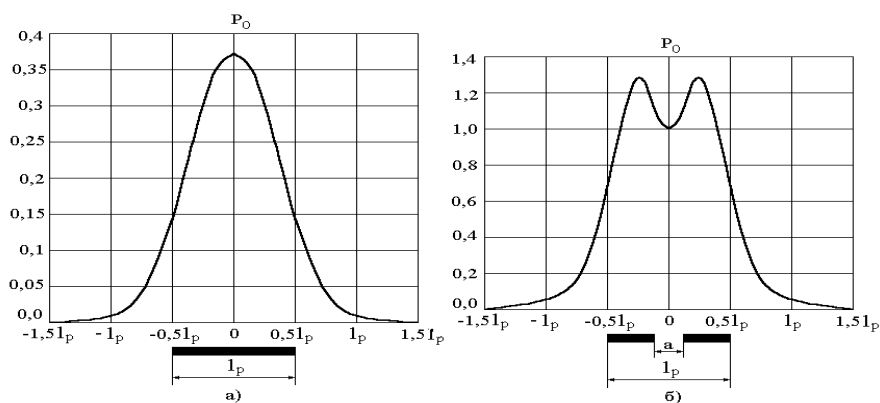


Рис.5. Розподіл магнітного тиску по поверхні труби:
а) одновитковий індуктор; б) двовитковий індуктор

Спираючись на результати рішення, можна сформулювати наступні висновки. Граничною умовою для циліндра повинне виступати вільне обпирання торців. Внутрішній тиск повинний бути прикладеним в локальних зонах, порівнянних з товщиною кілець. Варіювалася форма меридіонального перерізу кілець з метою одержання найбільш однорідного розподілу інтенсивності напружень у зоні контакту. На наступному малюнку представлені розподіли інтенсивності напружень при різних варіантах профілю кілець.

Виявилось, що найбільш вдалим є другий варіанта виконання. Далі була проведена серія розрахунків з метою визначення величини зовнішнього тиску, при якому інтенсивність напружень у матеріалі заготовки досягне границі текучості. Максимальна інтенсивність напружень у матеріалі заготовки перевищила границю текучості при величині зовнішнього тиску 25 МПа, при цьому значення максимальної інтенсивності дорівнює 178 МПа і відповідні деформації є малими. Максимальна інтенсивність напружень у матеріалі матриці приблизно така ж, отже, оснащення залишається працездатним.

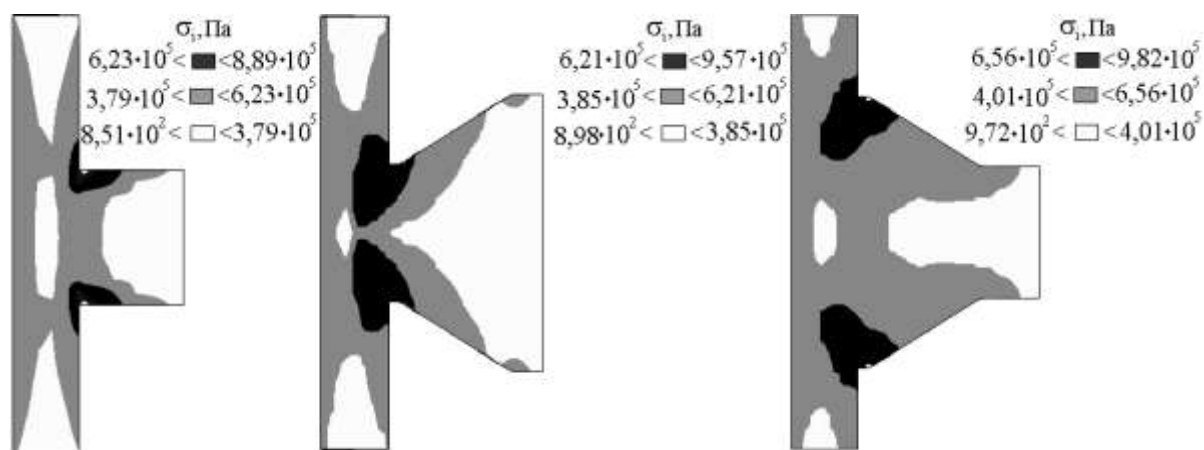


Рис. 6. Інтенсивності напружень у зоні контакту при різному профілі кілець
Висновки

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема, яка містить розробку ефективного методу розрахунку на міцність і жорсткість складених конструкцій технологічного оснащення з урахуванням контактної взаємодії та рішення на цій основі задач термопружно-пластичного деформування вісесиметричних складених конструкцій технологічного оснащення, призначеного для напівгарячого видавлювання і “роздачі” тонкостінних трубчастих заготовок магнітно-імпульсним штампуванням.

Найбільш важливі наукові і практичні результати дисертаційної роботи містять наступне:

1. Створено новий метод розрахунку на міцність і жорсткість із врахуванням критеріїв працездатності вісесиметричних складених конструкцій технологічного оснащення, що засновано на розв’язуванні методом скінчених елементів теплових та термопружно-пластичних контактних задач нелінійного деформування тіл із складною геометрією, які взаємодіють з різними механізмами тертя, при попередніх натягах або зазорах, в умовах нерівномірності температури і інтенсивних зовнішніх силових та теплових полів.

2. Надано розвиток методам моделювання контактної взаємодії між елементами складених конструкцій за рахунок введення в скінчено-елементні моделі “контактних шарів”, що здатні адекватно моделювати ідеальний тепловий контакт, зчеплення, прослизання, відрив, натяг, зазор і тертя за законами Кулона та Зібеля.

3. Встановлено достатню ступінь достовірності запропонованого методу та програмного забезпечення для розв’язування теплових та термопружно-пластичних контактних задач нелінійного деформування тіл із складною геометрією за їхнім тестуванням в окремих прикладах, які виявили, що для найбільш складних прикладів максимальна розбіжність між одержаними та аналітичними й відомими з літератури даними інших авторів не перевищує 20%.

4. Одержані рішення задач міцності і жорсткості для нових перспективних конструкцій складених бандажованих матриць для ХВ та НГВ, за якими надані обґрунтовані рекомендації для вибору раціональних значень параметрів охолодження та геометричних параметрів складеної матриці для НГВ циліндрово-конічних втулок, що використані на ДП "Завод ім. Малишева" (м. Харків) при розробці конструкторської документації на проектування.

5. Розроблено метод для дослідження операції "роздача" тонкостінних циліндричних заготовок при магнітно-імпульсному штампуванні за рахунок уперше створеної математичної моделі індукторних систем, одержаних розв'язків задач електродинаміки для визначення магнітного тиску та рішення проблеми контактної міцності системи "заготовка – матриця".

6. Отримані розрахункові дані з пружно-пластичного деформування елементів системи "заготовка – матриця" та надані експериментально і теоретично обґрунтовані пропозиції щодо створення нових видів технологічного оснащення для проектних технологічних систем МІШ.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бондарь С.В., Зубатый С.С., Лавинский Д.В. Исследование концентрации напряжений в пуансонах с клиновидной посадочной частью // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1998. – № 27. – С.188-192.

Здобувачеві належить конкретний алгоритм методики розв'язання контактної пружно-пластичної задачі, частина отриманих результатів.

2. Лавинский Д.В. Термоупругость составных бандажированных матриц // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. – № 76. – С.76-80.

3. Бортовой В.В., Лавинский Д.В. Контактное взаимодействие цилиндрических ортогональных оболочек // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2001. – № 25. – С.48-53.

Здобувачеві належить формулювання термopружнопластичної контактної задачі про взаємодію оболонок, а також чисельні результати.

4. Бондарь С.В., Лавинский Д.В. Контактное деформирование цилиндрической оболочки, опертой на радиальное кольцо // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2002. – № 10. т. 2. – С.18-23.

Здобувачеві належить постановка термopружнопластичної контактної задачі деформування, а також чисельні результати рішення.

5. Конохов В.И., Лавинский Д.В. Термоупругое контактное деформирование осесимметричных тел // Вісник Національного технічного універси-

тету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – № 5. – С.93-98.

Здобувачеві належить запропонований чисельний метод розв'язання контактної задачі теплопровідності і термопружності, всі чисельні результати.

6. Лавинский Д.В. Напряженно-деформированное состояние составной матрицы штампа при полугорячем выдавливании металлов // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – № 12. т. 1. – С.78-81.

7. Бондарь С.В., Лавинский Д.В. Анализ влияния величины натяга бандажа на параметры напряженно-деформированного состояния составной рабочей вставки многослойной матрицы // Сборник научных трудов ХГПУ “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. – Харьков: ХГПУ, 1999. – № 7. – Ч. 1. – С.252-254.

Здобувачем сформульовано задачу, відповідно розрахунків контактної пружно-пластичної взаємодії вісесиметричних тіл, деякі результати.

8. Бортовой В.В., Лавинский Д.В. Термоупругость составных бандажированных матриц // Вісник інженерної академії України. – Київ: Інженерна академія України, 2000. – Спеціальний випуск: інформація 2-ій міжнародній науково-технічній конференції “Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве”. – С. 471-474.

Здобувачеві належить постановка термопружнопластичної контактної задачі, а також чисельні результати рішення, частина висновків.

9. Бондарь С.В., Бортовой В.В., Лавинский Д.В. Контактное деформирование полого цилиндра и системы радиальных колец // Вісник інженерної академії України. – Київ: Інженерна академія України, 2002. – Спеціальний випуск: труди 5-ій міжнародній науково-технічній конференції “Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве”. – С. 591-594.

Здобувачеві належить постановка термопружнопластичної контактної задачі, а також чисельні результати рішення.

10. Бортовой В.В., Лавинский Д.В. К вопросу о нестационарной теплопроводности оболочечно-пластинчатых конструкций // Тезисы докладов научно-технической конференции “Актуальные проблемы механики оболочек”. – Казань: КГТУ, 2000. – С. 170.

Здобувачеві належить постановка задачі, розробка чисельного методу розв'язання і частина отриманих результатів.

11. Бондарь С.В., Лавинский Д.В. Контактное деформирование цилиндрической оболочки, опертой на радиальное кольцо // Доповіді міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (анотації). – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2001.- С.35.

Здобувачеві належить математична постановка термопружноплас-

тичної контактної задачі деформування, а також чисельні результати рішення.

АНОТАЦІЇ

Лавінський Д.В. Рішення контактних і температурних задач міцності для складених конструкцій технологічного оснащення. – *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, 2003.

У роботі на єдиній науково-методологічній базі створений ефективний метод аналізу міцності і жорсткості складених конструкцій технологічного оснащення при контактному і температурному навантаженні, що надало можливість вирішити комплекс складних проблем проектування складених конструкцій для традиційних методів обробки металів тиском (ОМТ) і для прогресивної технології магнітно-імпульсного штампування (МІШ). Запропоновано нові математичні моделі і розрахункові схеми складених конструкцій технологічного оснащення, які адекватно описують конструктивні і технологічні особливості складних об’єктів нової техніки стосовно обробляючої промисловості. Досліджені нові складені бандажовані матриці для напівгарячого видавлювання (НГВ) вісесиметричних заготовок, а також технологічні системи “заготовка – матриця” для операції МІШ – “роздача”. Представлені розробки відрізняються від існуючих можливістю уточненого врахування складних механізмів деформування таких систем, а також надають можливість спільного аналізу теплових і механічних процесів у рамках єдиного чисельного алгоритму. У комплексному дослідженні встановлені нові закономірності міцності і жорсткості названих конструкцій при термопружнім та термопружнопластичнім деформуванні з урахуванням контактного і теплового навантаження.

Ключові слова: термопружнопластичне деформування, контактна взаємодія, міцність, жорсткість, метод скінченних елементів, теплопровідність, складені бандажовані матриці.

Лавинский Д.В. Решение контактных и температурных задач прочности составных конструкций технологической оснастки. – 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, 2003.

Диссертационная работа посвящена разработке метода расчета на прочность и жесткость и решению с его помощью задач прочности составных

конструкций технологической оснастки при контактном и тепловом нагружении.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью создания эффективного метода расчета на прочность и жесткость составных конструкций технологической оснастки, к которым относятся матрицы штампов в традиционных методах обработки металлов давлением (ОМД) и системы “заготовка – матрица” в новых прогрессивных технологиях магнитно-импульсной штамповки (МИШ). В области динамики и прочности машин значительный научный и практический интерес представляют разработки в направлении создания новых эффективных методов анализа контактных явлений с учетом реальных особенностей взаимодействия при наличии неоднородного температурного поля.

Впервые, на единой научно-методологической базе создан эффективный, теоретически и экспериментально обоснованный, метод численного анализа прочности и жесткости составных конструкций технологической оснастки при контактном и тепловом нагружении, что позволило решить комплекс сложных проблем проектирования новой техники применительно к ОМД и МИШ.

Предложены математические постановки задач теплопроводности с учетом теплового контакта, а также смешанных контактных задач для осесимметричных составных конструкций при физически- и конструктивно-нелинейном деформировании их элементов в условиях контактного и теплового нагружения. На основе метода конечных элементов (МКЭ) созданы обобщенные расчетные схемы составных конструкций, моделирующие бандажированные матрицы для полугорячего выдавливания (ПГВ) осесимметричных заготовок и технологические системы “заготовка – матрица” для операции МИШ “раздача”. Разработан метод и алгоритм численного расчета теплопроводности, прочности и жесткости составных конструкций, в основу которого положены отличные от традиционных схемы применения МКЭ для решения сформулированных в работе краевых задач, отвечающих рассмотренному классу технологических систем. Выполнены исследования по достоверности разработанного метода расчета. Решены осесимметричные задачи теплопроводности и контактные задачи, изучены вопросы сходимости приближенных решений в зависимости от степени дискретизации. Установлено удовлетворительное соответствие полученных результатов при их сравнении с известными в литературе аналитическими данными.

Разработаны и теоретически обоснованы критерии для оценки прочности и жесткости объектов новой техники на этапах их проектирования и создания. На основе осесимметричных КЭ-моделей составных конструкций в численных исследованиях установлены новые качественные и количественные закономерности свойств прочности и жесткости таких конструкций при

термоупругом и термоупругопластическом деформировании при учете контактного взаимодействия.

Рассмотрены новые конструкторские и технологические проекты, которые включают создание составных бандажированных матриц для ПГВ осесимметричных заготовок и систем “заготовка – матрица” для МИШ тонкостенных цилиндрических заготовок. Для исследования прочности и жесткости составных конструкций технологической оснастки для МИШ предварительно был проведен анализ электромагнитных процессов с целью определения уровней развиваемого магнитного давления.

Созданный в работе метод и алгоритм представляют собой новую расчетную базу для анализа теплопроводности, прочности и жесткости составных конструкций при контактном и тепловом нагружении, что имеет существенное прикладное значение. На этой базе можно проводить расчеты сложных объектов новой техники и технологической оснастки на этапах их проектирования, создания и доводки. Данные разработки использованы в научных исследованиях и внедрены в практику предприятий г. Харькова.

Ключевые слова: термоупруго-пластическое деформирование, контактное взаимодействие, прочность, жесткость, метод конечных элементов, теплопроводность, составные бандажированные матрицы.

Lavinsky D.V. The contact and thermal task solving for the technological equipment compose constructions. – Manuscript.

Thesis for a Candidate of Engineering science degree by speciality 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines. – National Technical University “Kharkov Polytechnical Institute”, Kharkov, 2003.

The works in question on the united science methodological base the effective strength and stiffness analysis methods of the technological equipment compose constructions during contact and thermal loading was created. It permits to solve the complex problems of designing compose constructions for the traditional stamping methods and for the progressive pulse magnetic technology. The new mathematical models of the technological equipment compose constructions, which adequately draws constructional and technological peculiarity, are proposed. The new compose semi-hot extrusion dies and technological systems “slug – die” for the pulse magnetic stamping were investigated and designed. The proposed technique gives the possibility of the united heat-transfer and mechanical analysis in the united numerical algorithm.

As a result of complex investigations some new particularities were fixed of strength and stiffness properties for the technological equipment compose constructions during the thermal-elastic and thermal-elastic-plastic deforming under contact and thermal loading.

Key words: thermal-elastic-plastic deforming, contact interaction, strength, stiffness, finite element method, heat-transfer, compose bandaging dies.

Автореферат

**Рішення контактних і температурних задач міцності для складених
конструкцій технологічного оснащення**

Лавінський Денис Володимирович

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

Підп. до друку .03.2004р. Формат видання 145×215мм (60×90/16). Папір CopyRex.
Обсяг 0,9 авт. аркуша. Тираж 100. Зам.2-10.

Надруковано на ризографі НТУ "ХП".
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.