

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

**Іщенко Ольга Анатоліївна**



УДК 621.98.073:539.3

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ ШЛЯХОМ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНІСНИХ ТА  
ЖОРСТКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Краматорськ– 2019

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Ткачук Микола Анатолійович**,  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут» (м. Харків),  
завідувач кафедри теорії і систем автоматизованого  
проектування механізмів і машин

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Фролов Євгеній Андрійович**,  
Полтавський національний технічний університет  
імені Ю. Кондратюка (м. Полтава),  
професор кафедри будівельних машин і обладнання

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Левченко Володимир Миколайович**,  
Донбаська державна машинобудівна академія  
(м. Краматорськ),  
докторант кафедри «Обробка металів тиском»

Захист відбудеться «11» грудня 2019 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус, ауд. 1319).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус).

Автореферат розісланий «7» листопада 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 12.105.01



Ю. К. Доброносів

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Розвиток сучасного машинобудування неможливий без активного просування прогресивних технологій, обладнання, оснащення та інструменту. Зокрема, однією із домінуючих тенденцій є застосування технологій обробки матеріалів тиском. Дійсно, ці технології є за своєю природою надзвичайно ефективними, оскільки дають можливість істотно знижувати трудомісткість виготовлення деталей, підвищувати коефіцієнт використання матеріалу, а також у багатьох випадках обходитися без наступної механічної обробки, тобто одержувати готові деталі. У той же час одним із вузьких місць при впровадженні цих технологічних процесів є значна вартість технологічного оснащення та інструменту. Зокрема, для листоштампувального виробництва це пов'язане, наприклад, з виготовленням штампів та різальних елементів. Вони повинні мати високу точність і стійкість. З цією метою все більше застосування отримує оборотне переналагоджуване оснащення. Воно складається з основного блоку і змінного переналагоджуваного пакета, шляхом заміни якого можна перебудуватися на виготовлення тієї чи іншої деталі. Цим самим підвищується оперативність і знижується вартість технологічної підготовки виробництва нових виробів, що особливо важливо в умовах превалюючих тенденцій зниження серійності машинобудівного виробництва. При цьому підвищені вимоги до точності та стійкості розділових штампів (РШ) передбачають розробку адекватних, точних і економічних (з точки зору використання обчислювальних ресурсів) математичних і чисельних моделей та методів розрахунку проектно-технологічних параметрів проєктованих штампів за критеріями міцності і жорсткості з урахуванням множинного контакту їхніх елементів.

У той же час існуючі аналітичні та чисельні методики розрахунку елементів штампового оснащення (ЕШО) далеко не повною мірою відповідають висунутим вимогам. Зокрема, найбільш відчутним їх недоліком є не зовсім коректне урахування крайових умов в областях спряження окремих елементів досліджуваних штампів, що призводить до істотних похибок у визначенні їх напружено-деформованого стану (НДС). У свою чергу, це призводить або до недостатньої міцності та жорсткості, стійкості та точності штампа, або до завищеної металоємності. Протиріччя, яке склалося між можливостями науки і потребами практики, формує актуальну і важливу науково-практичну задачу розробки нових, більш адекватних, точних і оперативних моделей та методів розрахунку проектно-технологічних параметрів ЕШО за критеріями забезпечення міцності і жорсткості. Розв'язання цієї задачі для штампів, що здійснюють операції вирубки-пробивання листового матеріалу, є *актуальним* та складає напрямок дисертаційних досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») згідно з тематичним планом наукових досліджень. Теоретичні дослідження проводилися згідно з планом фундаментальних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України («Розробка теоретичних основ комп'ютерних кластерних технологій та унікального програмно-апаратного комплексу для дослідження складних та надскладних механічних систем» (№ ДР 0107U006813), «Розроблення технології дискретного зміцнення для збільшення ресурсів елементів конструкцій війсь-

кової та цивільної мобільної техніки» (№ ДР 0115U006518)), та в рамках договору про співпрацю між НТУ «ХПІ» та ПАТ «Азовмаш», м. Маріуполь, а також із ДП «Завод ім. В. О. Малишева» (ДП «ЗіМ»), в яких автор брала участь як виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** *Метою роботи є підвищення експлуатаційних властивостей та обґрунтування проектно-технологічних параметрів основних елементів розділових штампів для листового штампування на основі аналізу їх напружено-деформованого стану із урахуванням контактної взаємодії.*

*Це передбачає, у свою чергу, вирішення наступних завдань:*

- 1) здійснити аналіз сучасного стану методів розрахунку штампового оснащення, проектно-технологічних рішень на прикладі розділових штампів та визначити основні напрямки дисертаційних досліджень;
- 2) обґрунтувати вибір методів та засобів досліджень НДС елементів штампів для холоднолистового штампування з урахуванням множинної контактної взаємодії;
- 3) розробити математичну модель напружено-деформованого стану елементів РШ з урахуванням множинної контактної взаємодії, а також інтегрувати у цю модель набір варіюваних і контрольованих параметрів; створити удосконалені чисельні моделі НДС контактуючих елементів досліджуваних штампів для розділових операцій на основі розробленої математичної моделі; розв'язати на цій основі прикладні задачі дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів на міцність і жорсткість ЕШО; проаналізувати та узагальнити виявлені фізичні особливості у розподілі компонент НДС;
- 4) експериментально дослідити НДС і контактну взаємодію елементів РШ та розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору їх проектно-технологічних параметрів;
- 5) впровадити результати досліджень у виробництво на машинобудівних підприємствах.

**Об'єкт досліджень** – штампи для розділових операцій холодного листового штампування.

**Предмет досліджень** – закономірності впливу контактної взаємодії елементів розділових штампів на їх напружено-деформований стан.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених завдань залучалися методи теорії обробки металів тиском, теорії пружності, теорії варіаційних нерівностей, метод скінченних елементів (МСЕ), розрахунково-експериментальний метод визначення законів навантаження ЕШО на основі використання чутливих до тиску плівок, теорія тривимірного геометричного параметричного твердотільного і поверхневого моделювання. Чисельні дослідження проводилися із залученням ліцензійних комп'ютерних систем ANSYS (НТУ «ХПІ», ліцензія 2010 р. від фірми EMT U, м. Київ) і SolidWorks (ліцензія в рамках університетської програми). Для здійснення експериментальних досліджень використовувалися чутливі до тиску плівки, а також метод тензометрії. Для оцінки експериментальних даних використовувалися методи математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

1. **Вперше** визначені характерні особливості напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення з урахуванням множинної контактної взаємодії, що полягають у локалізації напружень на периферії області їх контактної взаємодії, і на цій основі установлені їх залежності від проектно-технологічних параметрів штампів, зокрема: варіювання товщини та діаметру провального отвору призводить до різкого збільшення напружень і переміщень точок базових плит при зменшенні об'єму матеріалу плити порівняно з номінальними раціональними значеннями і до незначного па-

діння – при істотному його зростанні; для реального діапазону варіювання проектних параметрів оснащення нижні власні частоти коливань набагато вищі частот дії збурювальних сил, у результаті чого встановлена правомірність квазістатичної постановки задачі задля більш оперативного визначення НДС елементів штампного оснащення.

2. **Вперше** встановлено, що при множинному контакті елементів штампного оснащення, який є багат шаровою конструкцією, область контактної взаємодії і характер розподілу контактної сили практично не змінюються при варіюванні сил штампного оснащення, а самі розподіли і максимальні значення контактної сили практично прямо пропорційно залежать від діючих сил штампного оснащення, що дає можливість розраховувати НДС елементів штампного оснащення для груп деталей, що штампуються, за результатами розрахунку для однієї деталі та масштабування пропорційно силі штампного оснащення.

3. **Уточнено** напружений стан, який реалізується при фіксації напрямних колонок і втулок у базових плитах переналагоджуваних штампів за допомогою полімерних компаундів у тонких з'єднувальних шарах, що утворюється при дії експлуатаційних навантажень, який має складний, а не однорідний, характер з різкими градієнтами напружень за товщиною; у зв'язку з цим критичні значення експлуатаційних навантажень у  $2,0 \div 2,5$  рази нижчі, ніж визначаються за спрощеними аналітичними виразами.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що вони послужили основою для створення спеціалізованої комплексної бази даних, де концентрується інформація про дослідження напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення різного конструкторського виконання, що є основою при прийнятті проектно-технологічних рішень за критеріями міцності та жорсткості, у першу чергу – базових плит розділових штампів. Обґрунтовані основні параметри при проектуванні штампів із забезпеченням необхідної точності та міцності при виконанні технологічних операцій із виготовлення штампованих деталей транспортних засобів спеціального призначення. Розроблено спеціалізований програмно-модельний комплекс (СПМК), який забезпечує проектувальнику можливість здійснювати уточнений аналіз НДС елементів штампів (перевірочний розрахунок) на заключних етапах проектних розробок. Цим самим скорочується обсяг доводочних робіт, а, відповідно, вартість проектування та виготовлення штампного оснащення в цілому. За результатами здійснених досліджень установлені раціональні співвідношення для визначення товщин базових плит РШ, які забезпечують міцність елементів, стійкість і точність штампувальних операцій. Розроблено рекомендації з проектування штампного оснащення з урахуванням множинної контактної взаємодії, зокрема, стосовно товщини нижньої базової плити на рівні  $12 \div 18$  % габаритних розмірів, що дає можливість на  $10 \div 15$  % зменшити металоємність розділових штампів для холоднолистового штампного оснащення.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені при виконанні бюджетних та договірних робіт, а також у ході виконання робіт за договорами про співпрацю НТУ «ХП» з ДП «ЗіМ» та підприємствами ПАТ «Азовмаш». На низці підприємствах ПАТ «Азовмаш», ДП «ЗіМ», ТОВ «ЮТАС» впроваджені розроблені програмно-модельні комплекси, а рекомендації, розроблені на основі отриманих за їх допомогою результатів, послужили основою при проектуванні штампів для розділових операцій холоднолистового штампного оснащення. Досягнуто економічний ефект за рахунок скорочення термінів розробки, зниження металоємності штампного оснащення та подовження терміну його експлуатації. Також здійснено впровадження в навчальний процес НТУ «ХП» при під-

готовці фахівців з напрямку «Прикладна механіка».

**Особистий внесок здобувача у роботах, виконаних у співавторстві.** Всі положення дисертації, винесені на захист, розроблені здобувачем самостійно. Зокрема, здійснені наступні дослідження: аналіз і узагальнення комплексу даних експериментальних досліджень контактних навантажень, напружень та деформацій ЕШО; розробка на основі параметричного підходу комплексної математичної моделі для дослідження процесів контактної взаємодії елементів РШ; розробка методів, моделей і алгоритмів для аналізу НДС і проведення чисельних досліджень при розв'язанні низки прикладних задач розрахунків елементів штампів; розробка рекомендацій із застосування створеного СПМК у практиці проектування та дослідження розділових штампів. Загальна постановка задачі та обговорення результатів дисертаційних досліджень здійснено спільно з науковим керівником. Внесок здобувачки в роботах, опублікованих разом зі співавторами, представлений в анотаціях до списку опублікованих праць за темою дисертації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати і положення роботи доповідалися на XIV-XVIII міжнародних науково-практичних конференціях (МНПК) XIV-XXVII «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MICROCAD, Харків, 2006–2018 рр.); МНТК «Університетська наука–2010» (Маріуполь, 2010); XLIII–L МНТК «Проблеми качества и долговечности зубчатых передач, редукторов, их деталей и узлов» (Севастополь, 2012, 2013; Одеса, 2014–2019); II МНПК «Машины і пластична деформація металів» (Запоріжжя, 2012); V, VII–XIV НТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії» (Харків, 2013, 2015–2018); XXI МНТК «Досягнення й проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (Краматорськ, 2018).

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи опубліковані у 26 роботах, в тому числі: 15 статей у фахових виданнях України, 1 – у зарубіжному виданні, 9 робіт – в матеріалах міжнародних конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5-ти розділів, висновків, додатків, списку використаних літературних джерел. Повний обсяг дисертації складає 238 сторінок, у тому числі – 152 сторінки основного тексту, 113 рисунків і 26 таблиць (з них 8 таблиць на 8 окремих сторінках і 20 рисунків на 7 окремих сторінках), 4 додатки на 58 сторінках, 178 найменувань використаних літературних джерел на 23 сторінках.

### Основний зміст роботи

**У вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами і темами. Сформульовано мету і задачі дослідження, надано характеристику об'єкта, предмета та методів дослідження. Відзначено особистий внесок здобувачки, показані наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, а також їх апробація.

**У першому розділі** проведено аналіз існуючих методів розрахунку НДС та дослідження контактної взаємодії елементів штампового оснащення. Різні методи дослідження точнісних, жорсткісних, стійкісних, міцнісних характеристик елементів штампового оснащення наведені у роботах І.С. Алієва, В.В. Драгобецького, Є.І. Заярненка, О.Я. Мовшовича, О.Ф. Тарасова, В.А. Тітова, Є.А. Фролова, В.М. Левченка, N. Kardes, W. Liu,

L.C. Zhang та інших дослідників. У їхніх роботах здійснено широкий спектр досліджень впливу проектно-технологічних параметрів оснащення, інструмента та обладнання на їх експлуатаційні характеристики. У той же час у цих роботах ключова компонента – контактна взаємодія – досліджена недостатньо повно. При цьому великий обсяг експериментальних даних не узгоджений із чисельними дослідженнями, які свого часу здійснені на спрощених моделях. Це пояснюється недостатньо розвиненими засобами комп'ютерного моделювання, наявними у свій час у цих дослідженнях. Таким чином, здійснений аналіз дав підстави визначити, що множинна контактна взаємодія є важливою, проте врахована недостатньо, та, у свою чергу, зробити висновок про актуальність і важливість поставленої задачі та визначити завдання досліджень.

У **другому розділі** виконане обґрунтування вибору та напрямків розвитку і застосування математичних моделей, чисельних та експериментальних методів, що використані та адаптовані у роботі для досліджень НДС РШ. Зокрема, визначені напрямки розвитку і застосування математичної моделі множинної контактної взаємодії елементів РШ. Для розробки моделей обрано чисельний метод скінченних елементів (МСЕ), для експериментальних досліджень – тензометрії, чутливих до тиску плівок та голографічної інтерферометрії. Вони доповнені методом узагальненого параметричного моделювання, за допомогою якого усі моделі та методи інтегруються в єдиний комплекс. Усі перелічені моделі, методи та засоби мають переваги для розв'язання задач, що виникають. Так, МСЕ дає широкі можливості для аналізу НДС деталей конструкцій, у т.ч. – з урахуванням контактної взаємодії. Метод параметричного моделювання дає змогу варіювати розрахункові моделі досліджуваних елементів ЕШО. Для експериментальних досліджень розроблено спеціальний стенд у вигляді навантажувального пристрою із тензометричною системою вимірювань величини сили. Метод з використанням чутливих до тиску плівок дає можливість безпосередньо вимірювати контактний тиск між деталями конструкцій.

У **розділі 3** описані теоретичні основи досліджень та пропонується удосконалена математична модель НДС ЕШО. У загальному вигляді задача дослідження міцності, стійкісних, жорсткісних і точнісних характеристик ЕШО виливається в систему диференціальних рівнянь, що утворюють початково-крайову задачу. Система розв'язувальних співвідношень може бути подана у операторному вигляді:

$$L(u, \sigma, p, f, t) = 0. \quad (1)$$

Тут  $L$  – оператор початково-крайової задачі,  $u, \sigma$  – вектор переміщень і тензор напружень елементів штампового оснащення,  $f$  – масив зовнішніх навантажень,  $t$  – час,  $p$  – масив узагальнених параметрів; саме вони визначають варіативність геометричної форми, розмірів, властивостей матеріалу ЕШО, саме завдяки їм вдається здійснювати різноманітні дослідження для обґрунтування раціональних параметрів елементів РШ.

У розгорненому вигляді співвідношення для визначення НДС ЕШО мають вигляд:

$$\varepsilon_{ij} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{i,r} \cdot u_{r,i}), \quad \sigma_{ij,j} + F_i = 0, \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}. \quad (2)$$

де  $*,_{i} = \partial */ \partial x_i$  – похідна за  $x_i$ ,  $r = \{x_1, x_2, x_3\}^T$  – радіус-вектор точок, утворений набором декартових координат  $x_1, x_2, x_3$ ;  $u_i$ ,  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  – компоненти вектора переміщень точок до-



сліджуваних об'єктів, тензорів деформацій і напружень відповідно,  $C_{ijkl}$  – тензор модулів пружності матеріалів, з яких складаються досліджувані елементи,  $F_i$  – компоненти об'ємного навантаження; індекси  $i, j, k, l = 1, 2, 3$  (при їх повторенні у виразі діє правило підсумовування за цим індексам).

На відміну від класичних, є крайові умови на поверхнях  $S_C$  (з номерами  $s$  та  $g$ ) можливого контакту з зазорами  $\delta_{sg}$ , що означають непроникнення тіл одне в одного:

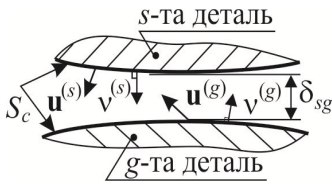


Рисунок 1 – Умови контактної взаємодії елементів РШ

$$\left( u_i^{(s)} n_i^{(s)} + u_k^{(g)} n_k^{(g)} \right) \Big|_{S_C} \leq \delta_{sg}. \quad (3)$$

Тут  $u, n$  – компоненти переміщень та нормалей відповідно (рис. 1).

Ці умови, на відміну від традиційних, мають вигляд нерівностей. Це відразу ж перетворює задачу у нелінійну. При її розв'язанні необхідно визначати і зони контакту, і контактний тиск

$$q = q(r) \Big|_{S_C} \geq 0. \quad (4)$$

Якраз у цьому – основна складність її розв'язання.

Особливістю ЕШО є наявність не одиничного, а множинного контакту на поверхнях узгодженої форми, зокрема, на плоских поверхнях. З урахуванням нелінійності задачі (1)–(4), а також варіативності технічних рішень штампів, приходимо до оперування з великим масивом складних задач. Відповідно, різко зростають вимоги до часу і обчислювальних ресурсів. У той же час ці дослідження потрібно здійснювати оперативно. У результаті стикаємося з центральним протиріччям методологічного плану.

Для розв'язання цієї суперечності були здійснені теоретичні розробки у двох напрямках. Перший відноситься до тенденції зміни розв'язку варіаційної задачі. Дійсно, із розв'язку задачі мінімізації функціонала повної внутрішньої енергії

$$I(v) = \frac{1}{2} \sum_s \int_{(\Omega_s)} \sigma_{ij}^{(s)} \cdot \varepsilon_{ij}^{(s)} d\Omega - \sum_s \int_{(S_g^{(s)})} \sigma_i^{\wedge} u_i dS - \sum_s \int_{(S_C)} \sigma_{sj} \cdot v_j \cdot u_s dS \quad (5)$$

на множині

$$K \in \left\{ v^{(s)} : \left( v_i^{(s)} n_i^{(s)} + v_k^{(g)} n_k^{(g)} \right) \Big|_{S_{sg}} \leq \delta_{sg} \right\}, \quad (6)$$

що задається лінійними обмеженнями (3), можна прийти до наступного висновку: якщо за якимось параметром досягається безумовний мінімум, то спостерігається зміщення на таку ж величину, як і сила штампування; у випадку попадання на обмеження за якимось параметром, зростання відбувається порівняно з початковим значенням на таку ж величину в цій області (рис. 2). Іншими словами, положення умовного та безумовного мінімумів (у варіанті (4)) від навантаження залежать лінійно.

Отримуємо, що з ростом сил штампування зона контакту не змінюється, закон розподілу контактного тиску залишається стабільним, а компоненти НДС прямо йому пропорційні. Цей результат дає можливість різко скоротити обсяги чисельних досліджень за рахунок зменшення варіантів аналізу НДС елементів штампів.

Другий напрямок відноситься до часового розподілу компонент НДС. Дійсно, про-



цес штампування за своєю суттю є динамічним. Для визначення значущості вкладу інерційних складових необхідно зіставити частоту збурення від  $P_{шт}$  з власними частотами коливань ЕШО. Для цього, відштовхуючись від скінченно-елементного формулювання

$$M\ddot{\mathbf{X}} + C\dot{\mathbf{X}} = 0, \quad (7)$$

де  $M$ ,  $C$  – матриця мас і жорсткості, а  $\mathbf{X}$  – вектор вузлових змінних, що описує стан досліджуваного об'єкта, слід розв'язати задачу про власні частоти  $\omega_i$  та власні форми коливань  $\lambda_i$ :

$$(C - \omega^2 M)\lambda = 0, \quad \text{Det}(C - \omega^2 M) = 0. \quad (8)$$

Як показали результати подальших чисельних експериментів, частота збудження від кривошипно-шатунних пресів на порядки нижча власних частот коливань (ВЧК) базових плит, блоків  $\nu = 1/T \ll \nu_1 = 1/T_1$ . Таким чином, обґрунтовується квазістатична постановка задачі. У результаті запропоновано теоретичні основи аналізу НДС ЕШО з урахуванням не одиничного (тобто якогось одного елемента з іншим), а множинного контакту (тобто декількох елементів одночасно) для забезпечення необхідних міцнісних, жорсткісних, стійкісних і точнісних характеристик РШ.

Створені математичні моделі знайшли свою реалізацію у вигляді СПМК, представленого на рис. 3. Він поєднує, з одного боку, спеціальні модулі, а з іншого, – універсальні пакети типу SolidWorks, Creo (там створені параметричні та геометричні моделі), а в ANSYS – скінченно-елементні моделі (СЕМ) елементів РШ. Це дало можливість перейти до розв'язання прикладних задач, описаних у розд. 3 далі. У першу чергу, були досліджені ВЧК і власні форми коливань (ВФК) нижніх базових плит, а також блоків РШ у зборі. Зіставлення спектрів ВЧК і ВФК (рис. 4, 5)

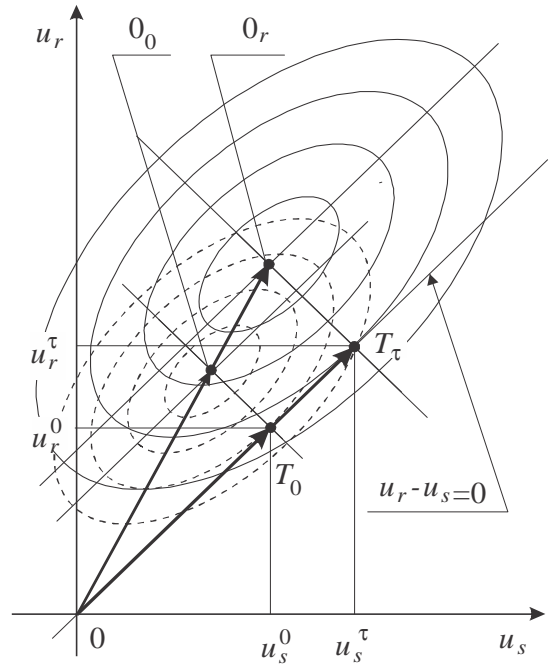


Рисунок 2 – Лінії рівня функції  $I$  в перерізі координат  $u_r - u_s$

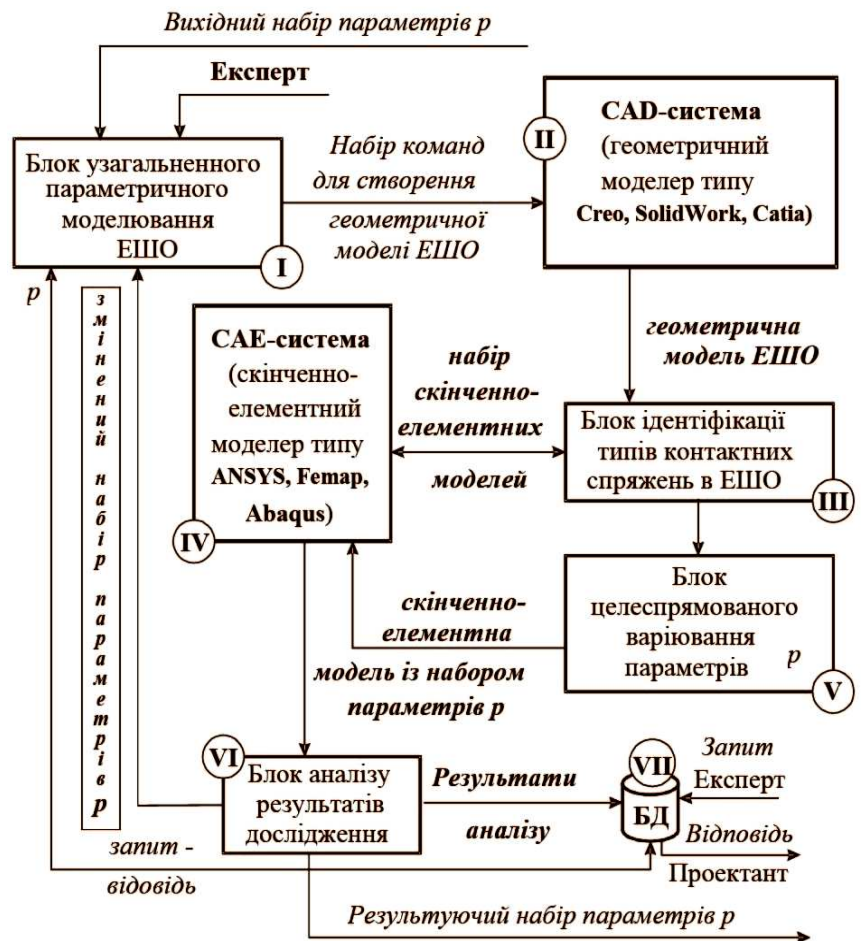


Рисунок 3 – Структура СПМК для дослідження НДС ЕШО з урахуванням контактної взаємодії

з частотою навантаження і видом навантаження однозначно підтверджує можливість і правомірність квазистатичної постановки задачі аналізу НДС ЕШО, оскільки нижні частоти власних коливань вищі, ніж частоти збурення.

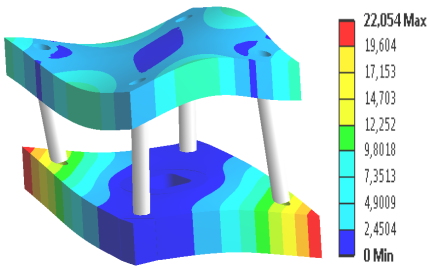


Рисунок 4 – Приклад ВФК блока штампа з частотою 4,24 Гц (Shell-конструктиви)

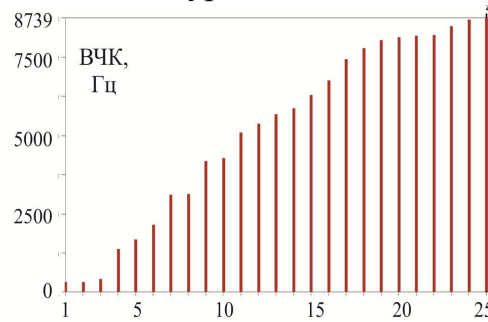


Рисунок 5 – Спектр ВЧК (Гц) блока штампа (Shell-конструктиви)

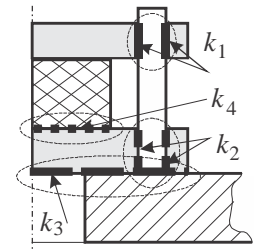


Рисунок 6 – Елементи досліджуваної технологічної системи та відповідні характерні зони контактної взаємодії  $k_1 \div k_4$

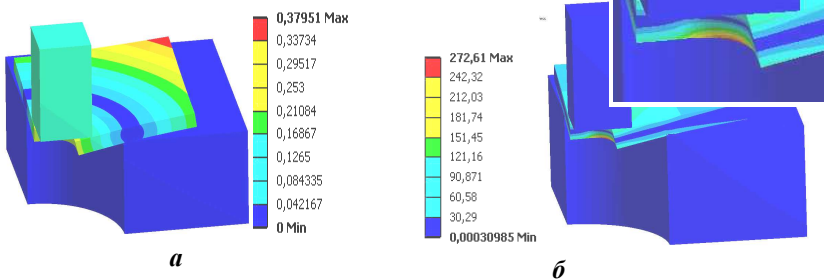


Рисунок 7 – Результати дослідження НДС елементів штампа:  
а – розподіл повних переміщень;  
б – еквівалентні напруження за Мізесом

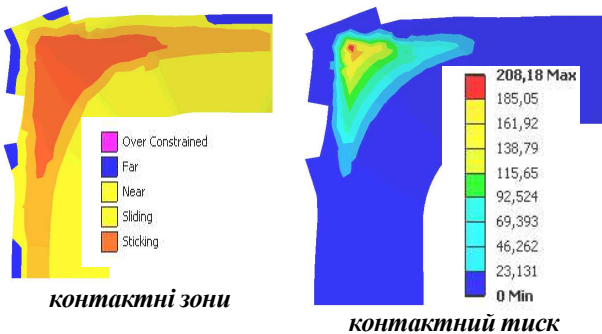


Рисунок 8 – Результати дослідження НДС елементів штампа у сполученні змінного пакету та базової плити

мірності (рис. 7, 8): напруження в елементах цієї підсистеми концентруються у зонах їх механічного контакту; напруження і контактний тиск розподіляються на площах контактної сполучення нерівномірно; інтегральні залежності характеристик НДС від варійованих параметрів (у цьому випадку – товщина базової плити і діаметр провального отвору) відповідають «гіперболічній» поведінці (рис. 9, різке зростання при зменшенні об'єму матеріалу деталі нижче певної межі, практично незмінна величина – при зростанні цього об'єму вище деякої іншої межі і плавну зміну у перехідному діапазоні).

Також встановлено особливості контактної взаємодії напрямних колонок із запресовкою та із заливкою епоксидним компаундом в отвір у нижній базовій плиті (рис. 10). Як видно з наведених графіків і розподілів (рис. 10, 11), для випадку запресовки спостерігаються такі закономірності: найбільш навантаженими від горизонтальних сил зонами є області, що примикають до з'єднання колонок з плитами; контактний тиск у сполученні «колонка – плита» розподіляється нерівномірно, і чим менший натяг, тим більша ця нерівномірність; для випадку з'єднання епоксидною смолою: напруження у цьому випадку набагато нижчі, ніж у разі посадки колонок з натягом; переміщення колонок від дії горизонтальних сил вищі, ніж у разі посадки колонок з натягом; розподіл напружень у

шарі клейового компаунда після полімеризації та прикладання навантаження нерівномірний за висотою; незважаючи на більш низький рівень напружень, ніж у випадку посадки з натягом; слід врахувати також і більш низький рівень механічних характеристик матеріалу клейового шару порівняно з властивостями металу, з якого виготовлені колонка і плита; залежності інтегральних характеристик НДС дослідженої підсистеми від величини сил носять приблизно прямо пропорційний характер з відхиленням до 3%.

На завершення на більш докладній моделі НДС блоку РШ досліджено у комплексі поведінку штамп у зборі. Як впливає з аналізу отриманих результатів, НДС цієї підсистеми має ті ж особливості, що були встановлені на частинних моделях. Дійсно, підтверджені закономірності (рис. 12–17), а саме щодо істотно нерівномірного розподілу контактного тиску у сполученнях ЕШО виконуються з відмінністю до 5%. Те ж можна сказати і про розподіл повних переміщень, еквівалентних напружень за Мі-

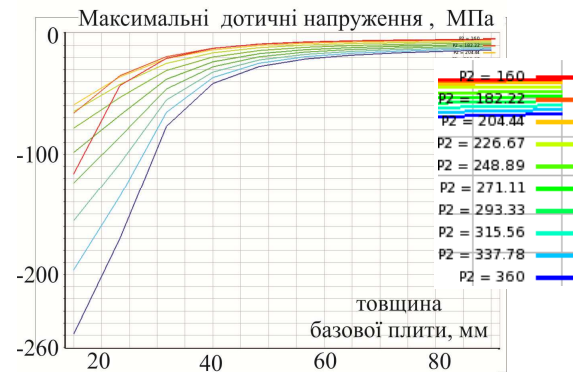
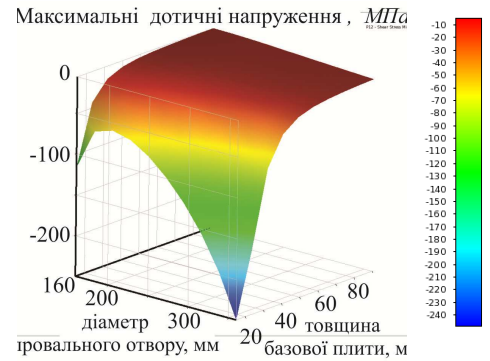


Рисунок 9 – Залежність максимальних за величиною дотичних напружень від товщини базової плити та діаметра провального отвору

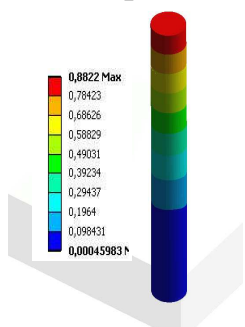


Рисунок 10 – Розподіл повних переміщень у колонці штамп

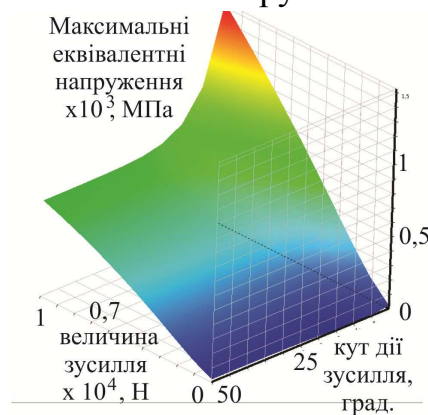


Рисунок 11 – Залежність максимальних еквівалентних напружень від параметрів  $p_1, p_2$  (кут дії та величина зусилля відповідно)

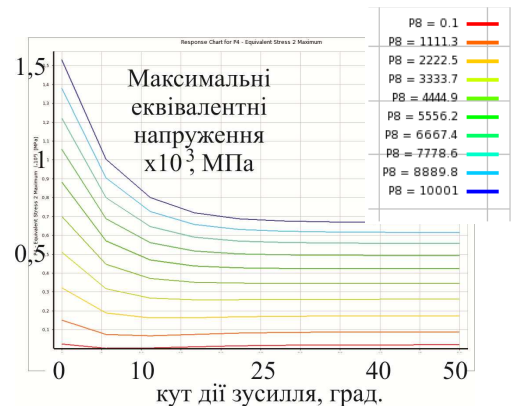
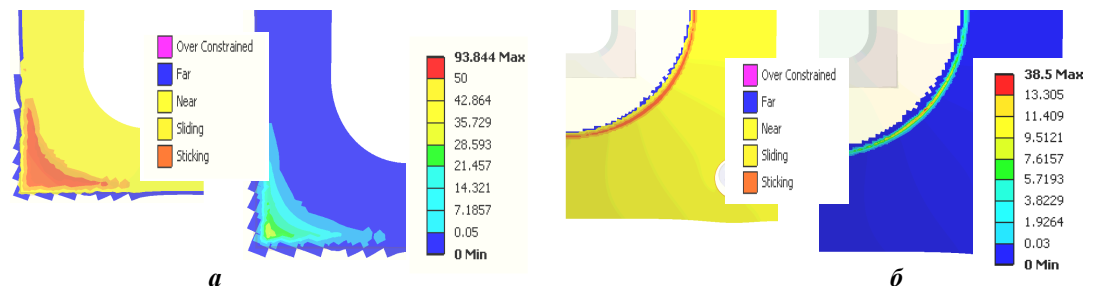


Рисунок 12 – Картини розподілу контактного тиску (МПа) у зонах:  $a - k_4$ ,  $b - k_3$  ( $P_{шт} = 10$  кН) (див. рис. 6)



зесом (рис. 13–16). З усієї системи можна виокремити картини НДС окремих елементів (рис. 14–16). Вони також дають підставу підтвердити прогнозовані особливості НДС, обґрунтовані на частинних моделях: про концентрацію напружень у зонах контактної взаємодії окремих ЕШО та про значні рівні пружних переміщень. На рис. 17 наведені

отримані результати щодо впливу сил штампування на контактний тиск. З задовільною для практики точністю відзначена лінійна залежність контактного тиску від зусиль штампування з похибкою до 2÷4 %. На рис. 18 – залежність прогинів та напружень від товщини нижньої плити та діаметра провального отвору. Видно, що проектно-технологічні чинники здійснюють істотний вплив на жорсткісні та міцнісні характеристики ЕШО.

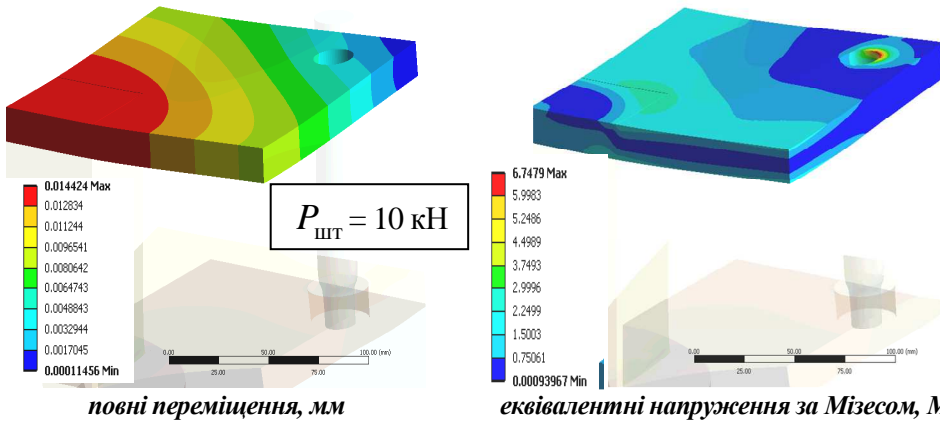


Рисунок 13 – Картини розподілу компонент НДС у верхній базовій плиті

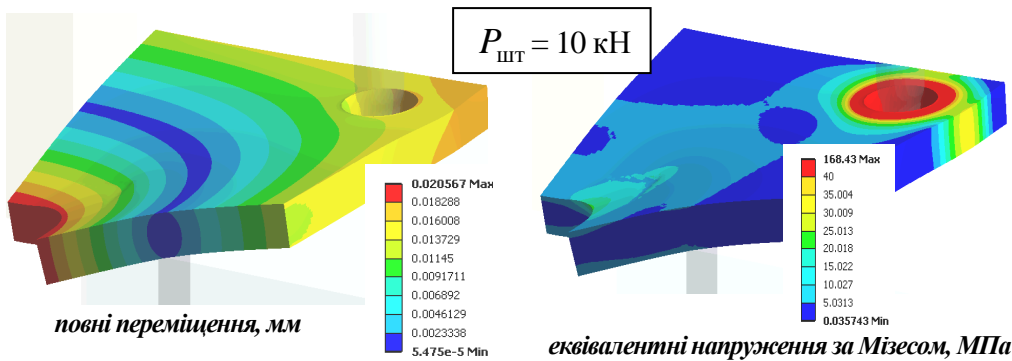


Рисунок 15 – Картини розподілу компонент НДС у нижній базовій плиті

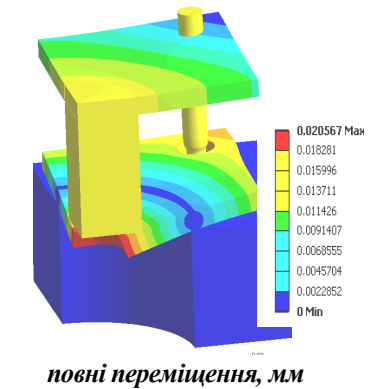


Рисунок 14 – Картини розподілу компонент НДС

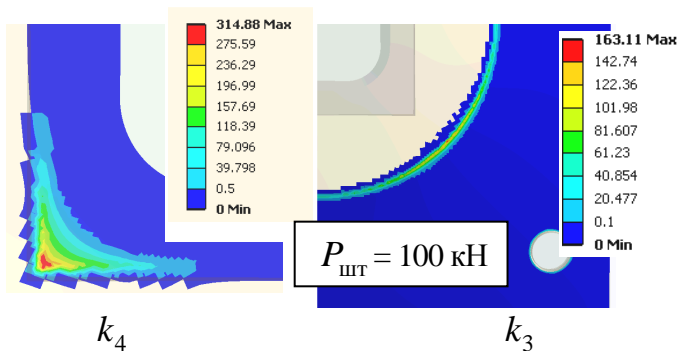


Рисунок 16 – Картини розподілу контактного тиску, МПа, у зонах  $k_4$ ,  $k_3$  (див. рис. 6)

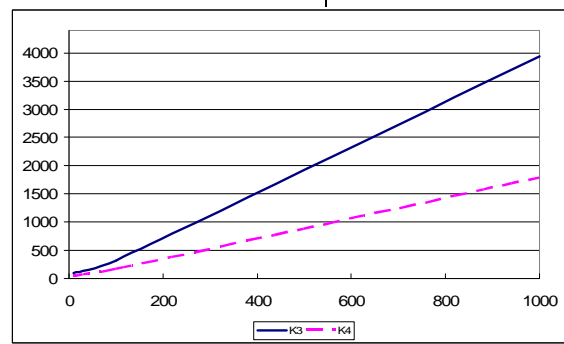


Рисунок 17 – Залежність максимального контактного тиску, МПа, у сполученнях  $k_4$ ,  $k_3$  від величини сил штампування (кН)

Якщо брати до уваги абсолютні значення обмежень за прогинами базової плити і рівнем напружень, то її параметри слід обирати із умов конкретної задачі. Так, рівень прогинів 30 мкм забезпечується за товщини плити  $h = 45$  мм та діаметра провального отвору  $D = 160$  мм. Рівень напружень до 100 МПа забезпечують  $h = 45$  мм та  $D = 175$  мм. Якщо ж виходити із чутливості жорсткісних та міцнісних характеристик ЕШО до зміни варійованих параметрів, то рекомендовані діапазони: за прогинами –  $h \geq 45$  мм та  $D \leq 160$  мм, а



за напруженнями –  $h \geq 45$  мм та  $D \leq 175$  мм.

Таким чином, можна зробити висновок, що якісну картину розподілу компонент НДС можна проаналізувати за результатами дослідження більш повної моделі штампа, у той же час, як кількісні залежності характеристик НДС від варійованих параметрів можна визначати за результатами розрахунку із застосуванням частинних моделей, що менш громіздкі, а, значить, – і вимагають менше обчислювальних витрат на комп'ютерне моделювання. У результаті забезпечується збалансування точності отриманих результатів і складності створюваних моделей.

**Четвертий розділ** присвячений експериментальним дослідженням, статистичній обробці та аналізу їхніх результатів. Для обґрунтування точності одержуваних чисельно результатів дослідження НДС елементів штампового оснащення вони були зіставлені з даними експериментальних досліджень. При цьому були використані як дані, отримані іншими дослідниками, так і одержувані у ході самостійно проведених експериментів результати. Достовірність отриманих результатів експериментальних досліджень оцінювали на основі застосування методів математичної статистики. Зокрема, були залучені результати досліджень НДС базових плит методом голографічної інтерферометрії, тензометрії і контактних відбитків. Відповідність чисельно і експериментально отриманих результатів, причому як у ході власних, так і у ході випробувань, проведених іншими дослідниками, становить 10–17% за середнім відхиленням контактного тиску, визначеного чисельно та експериментально (рис. 19, 20).

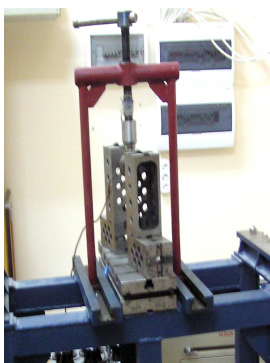
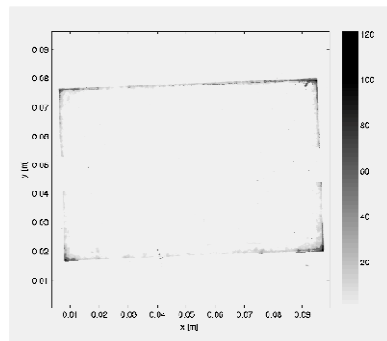
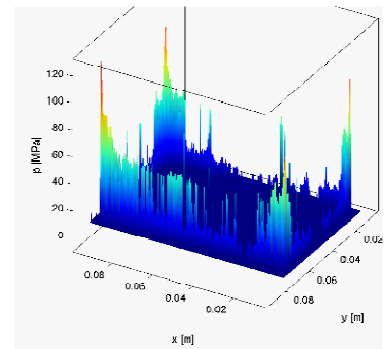
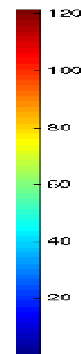


Рисунок 19 – Загальний вигляд стенду



відбиток



розподіл тиску

Рисунок 20 – Результати дослідження взаємодії макета пакета із базовою плитою: площа поверхні – 358.08 мм<sup>2</sup>,  $P = 5938.11$  Н,  $p_{\max} = 121.21$  МПа

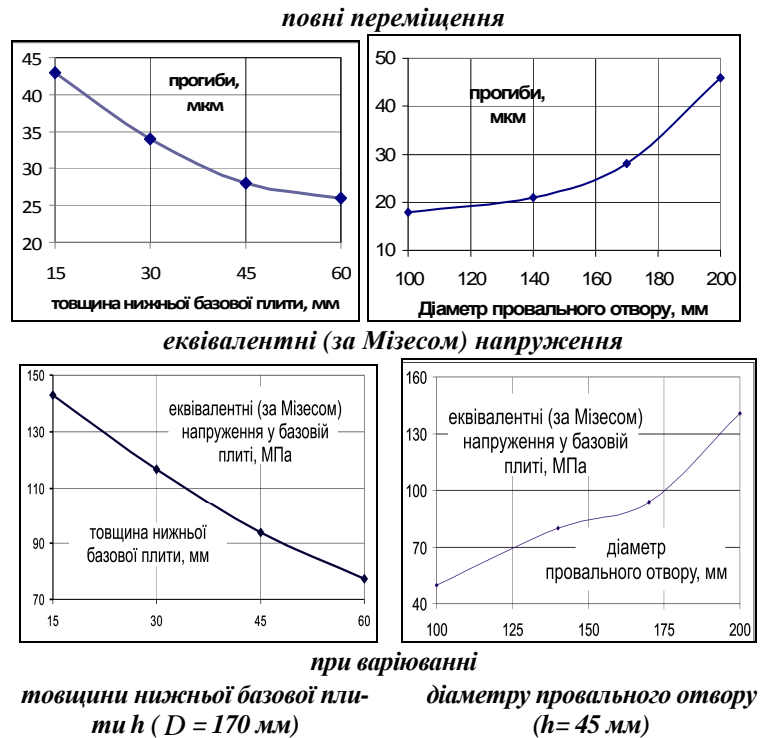


Рисунок 18 – Залежність компонент НДС у базовій плиті від варійованих параметрів

У п'ятому розділі описано впровадження результатів досліджень у виробництво. Зокрема, отримані результати служать як основа при обґрунтуванні раціональних проект-

но-технологічних рішень РШ. Зокрема, мова йде про обґрунтування товщини нижніх базових плит РШ, величин натягів для закріплення напрямних колонок або властивостей клейових сумішей, діаметра провального отвору, зусиль штампування тощо.

Що стосується вимог до стійкості, міцності, жорсткості і точності виконання технологічних операцій, то вони безпосередньо залежать: міцність – від рівня напружень в основних, найбільш навантажених ЕШО  $\sigma_3^{\max} \leq [\sigma]$ , жорсткість штампування – від рівня переміщень і поворотів ЕШО  $w_{\max} \leq [w]$ ;  $w'_{\max} \leq [w']$ .

Зокрема, на базі проведених досліджень досягнуто зниження рівня контактного тиску та еквівалентних напружень у базових плитах на 20–25%, а переміщень – на 25–30% за рахунок раціонального вибору товщини нижніх базових плит, габаритних розмірів, товщини та матеріалів деталей, що штампуються.

Перевагою цього підходу (порівняно з відомими), є висока оперативність і точність, що дуже цінно в умовах стислих термінів і обмежених матеріальних ресурсів при проектуванні технологічної оснастки для штампування деталей на підприємствах в умовах низької серійності виробів і швидкої зміни їхньої номенклатури. Так, при проектних дослідженнях штампів для ДП «ЗіМ» терміни комп'ютерного моделювання НДС їх елементів знижено у 2,2÷2,5 разів. Результати дисертаційних досліджень були впроваджені в практику науково-дослідних, конструкторсько-технологічних робіт, а також у навчальний процес, зокрема, у ПАТ «Азовмаш», ДП «ЗіМ», ТОВ «ЮТАС» та НТУ "ХП".

## ВИСНОВКИ

Робота містить опис розв'язання актуальної та важливої для машинобудування, зокрема, стосовно процесів та машин обробки тиском, науково-технічної задачі розробки методів забезпечення характеристик розділових штампів на основі дослідження міцності та жорсткості їхніх елементів на етапі проектних досліджень. Розв'язано низку задач та отримані на цій основі нові наукові результати, які дають підставу для наступних висновків.

1. Аналіз літературних джерел показав, що на теперішній час відсутнє повне розв'язання задачі обґрунтування проектно-технологічних параметрів елементів штампового оснащення за критеріями підвищення експлуатаційних характеристик. Це зумовило актуальність науково-практичної задачі розробки методів дослідження напружено-деформованого стану на прикладі розділових штампів з урахуванням контактної взаємодії.

2. Виділено технологічні системи різного рівня складності, елементи яких набувають властивості варіативності проектно-технологічних параметрів завдяки застосуванню та адаптації методу параметричного моделювання на основі системного підходу, що забезпечує можливість ставити і розв'язувати задачі їх обґрунтування за критеріями забезпечення експлуатаційних характеристик.

3. Розроблена комплексна математична модель напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення шляхом урахування множинної контактної взаємодії елементів досліджуваних технологічних систем, у яку інтегровані проектні та технологічні параметри, що дає можливість розв'язувати задачі синтезу на основі більш достовірних нелінійних задач аналізу.

4. Розроблений спеціалізований програмно-модельний комплекс для програмної реалізації створеної комплексної математичної моделі надає, на відміну від традиційних засобів комп'ютерного моделювання, можливості розв'язання не лише одиничних задач

аналізу, але і цілих їх серій у автоматизованому режимі. Забезпечується також відсутня у традиційних комп'ютерних пакетах можливість послідовного ускладнення ("нарощення" складу і структури) рівня розрахункових моделей. Це створює можливість аналізу ступеня достовірності та області застосування закономірностей, встановлених на моделях нижнього рівня: у разі якісного та кількісного "успадкування" результатів розрахунку при застосуванні моделі верхнього рівня забезпечується висока ступінь достовірності та широка область застосування. В іншому випадку цикл ускладнення моделей повторюється. Підтверджені закономірності впливу рівня сил штампування, а також конструктивних параметрів на контактний тиск та контактні площадки, на рівень напружень і переміщень та на динамічні характеристики елементів і штампів в цілому, а саме - незмінність області контакту та характеру розподілу контактної тиску між елементами штампів при варіюванні сили штампування.

5. Аналіз спектру частот коливань елементів розділових штампів показав можливість квазістатичної постановки задачі аналізу напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення. Крім того, для системи контактуючих за узгодженими поверхнями елементів розділових штампів встановлена справедливність лінійної залежності рівня контактних тисків від сил штампування та практично незмінність площадки контакту при їх зміні. Установлені закономірності дають можливість, на відміну від традиційних підходів, здійснювати не одиничне розв'язання задач аналізу напружено-деформованого стану, а групове – для цілої серії матеріалів, товщин та параметрів штампованих деталей. Це дає можливість підвищувати оперативність проектних досліджень міцності та жорсткості елементів розділових штампів зі збереженням точності одержуваних результатів

6. Шляхом розв'язання низки прикладних задач контактної взаємодії елементів штампового оснащення встановлені закономірності впливу множини варіюваних параметрів на їхню міцність, жорсткість, точність і стійкість, що дає можливість розробляти рекомендації з обґрунтування раціональних технічних рішень при проектуванні та виготовленні штампів для розділових операцій холоднолистового штампування. Зокрема, виявлено "гіперболічний" за характером вплив конструктивних параметрів елементів розділових штампів на характеристики напружено-деформованого стану. Так, при зміні товщини нижньої базової плити, розмірів змінного пакета або діаметра провального отвору у підштамповій плиті преса напруження та переміщення точок елементів штампів при зміні їхньої маси порівняно з раціональним рівнем або різко зростають (у разі зменшення), або практично не змінюються (у разі збільшення). Зокрема, наприклад, для досліджених штампів при зменшенні товщини нижньої базової плити штампа з 40 до 20 мм рівень еквівалентних напружень збільшується з 250 до 800 МПа, а при збільшенні з 40 мм до 60 мм – зменшуються до 180 МПа. Для одного із досліджуваних варіантів при варіюванні діаметра провального отвору у підштамповій плиті преса від номінального рівня 250 МПа на 50 мм у бік зменшення максимальні переміщення зменшуються з рівня 380 мкм до 120 мкм, а при збільшенні на 50 мм – збільшуються до 700 мкм. З іншого боку, технічні параметри (фізико-механічні властивості штампованого матеріалу, фіксуємого матеріалу для заливки напрямних колонок або величини натягу при посадці напрямних колонок) впливають на рівень напружень та переміщень в елементах штампа практично за лінійною залежністю. Установлені залежності, отримані в ході багатоваріантних розрахункових досліджень є основою для прийняття проектно-технологічних рішень для розділових штампів.

7. Експериментальні дослідження в цілому підтверджують встановлені розрахунко-



вим шляхом закономірності та отримані результати. Отримана повна якісна та задовільна кількісна відповідність даних розрахунків і експериментів. Похибка за розрахунками контактного тиску, напружень і переміщень знаходиться на рівні 12-17%. При цьому спостерігається повна відповідність тенденцій зміни компонент напружено-деформованого стану при варіюванні проектно-технологічних параметрів досліджених штампів.

8. Результати дисертаційних досліджень у вигляді розроблених моделей, програм, закономірностей і рекомендацій впроваджені на низці машинобудівних підприємств при проектуванні та виготовленні штампів для виробництва деталей транспортних і технологічних машин з економічним ефектом 320,0 тис. грн., що підтверджено відповідними актами впровадження, доданими до роботи, а також здійснено упровадження у навчальний процес НТУ «ХПІ» для студентів спеціальностей "Прикладна механіка".

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Расчетно-экспериментальное исследование элементов штамповой оснастки / Н. А. Ткачук., О. А. Ищенко, Н. Н.Ткачук, А. А. Атрошенко // Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – Краматорськ: ДДМА, 2017. № 3 (24Е). С. 11–19. ISSN 2219-7869.
2. Напряженно-деформированное состояние элементов разделительных штампов при варьировании граничных условий / О.А. Ищенко, Н.А. Демина, Ю.Д. Сердюк, А.В. Ткачук, А.Ю. Танченко // Механіка та машинобудування. Харків: НТУ «ХПІ», 2011. №1. С.38–42.
3. Формирование комплексных расчетных моделей элементов штампов для разделительных операций / Ищенко О.А., Ткачук А.В., Грабовский А.В., Демина Н.А. // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 12 (1184). С.23–30. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.04.
4. Влияние геометрических параметров базовых плит на их напряженно-деформированное состояние / О.А. Ищенко, Н.А. Демина, А.В. Грабовский, А.В. Ткачук // Обработка материалов давлением. Сб. науч. тр. – Краматорськ: ДДМА, 2012. №2(31). С. 221–226.
5. Определение силовых воздействий на элементы сложных механических систем / Н.А. Ткачук, О.А. Ищенко, Ю.В. Веретельник, Е.Н. Барчан // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Мелітополь: ТДАА, 2006. Вып. 36. С.141–149.
6. Контактна взаємодія елементів розділових штампів: моделі, закономірності, критерії проектних рішень. / О. А. Ищенко, М. А. Ткачук, А.В. Грабовський. и др. // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 1. С. 47–59.
7. Моделирование напряженно-деформированного состояния базовых плит разделительных штампов /О.А. Ищенко, Н.А. Демина, А.В. Грабовский, Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. Москва, 2012. № 9. С. 40–44.
8. Ищенко О.А. Формирование комплексных расчетных моделей элементов штампов для разделительных операций / О.А. Ищенко, Н.А. Ткачук, Г.А. Кротенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 47 (953). С. 34–38.
9. Демина Н.А. Экспериментальные исследования контактного взаимодействия мат-

риц и пуансонов с листовой заготовкой / Н.А. Демина, О.А. Ищенко, Ю.Д. Сердюк // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХП», 2011. – № 22. – С.46–50.

10. Базовые плиты разделительных штампов: напряженно-деформированное состояние с учетом контактного взаимодействия / О.А. Ищенко, Н.А. Демина, А.В. Грабовский, А.В. Ткачук // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. Харків: НТУ «ХП», 2011. № 51. С. 50–59.

11. Ткачук А.Н. Экспериментальное исследование контактного взаимодействия сопряженных тел. / А.Н. Ткачук, О.А. Ищенко, А.В. Ткачук // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. Харків: НТУ «ХП», 2012. № 22. С. 116–120.

12. Анализ влияния свойств фиксирующего материала на напряженно-деформированное состояние системы «базовая плита – направляющие колонки» разделительных штампов / О. А. Ищенко, А.В. Грабовский, А. В. Ткачук, Г. А. Кротенко, Н. А. Ткачук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2013. № 43 (1016). С.104–109. Режим доступу: [http://library.kpi.kharkov.ua/Vestnik/2013\\_42.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/Vestnik/2013_42.pdf)

13. Применение расчетно-экспериментального метода для анализа напряженно-деформированного состояния элементов механических систем / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Г.Н. Ефимова, О.А. Ищенко // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Наук. фах. видання. Мелітополь: ТДАА, 2006. Вип.43. С.30–37.

14. Ищенко О.А. Контактное взаимодействие элементов штампов для разделительных операций / О.А. Ищенко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. Запоріжжя: Запоріз. нац. техн. ун-т, 2013. № 1. С. 93–96.

15. Параметрические модели для комп'ютерного моделирования контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки / О. А. Ищенко, Н. Н. Ткачук, А. В. Грабовский, Н. А. Ткачук, Н. А. Демина, А. А. Зарубина // Вісник НТУ «ХП». Сер. : Машинознавство та САПР. Харків: НТУ «ХП», 2016. № 39(1211). С. 66–78. Режим доступу: [http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2016\\_39.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2016_39.pdf),

16. Компьютерное моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки / О. А. Ищенко, Н. А. Демина, Н. Н. Ткачук, Н. Б. Скрипченко, А. В. Грабовский, Г.А. Кротенко, А.В. Ткачук, А.А. Зарубина, О. В. Кохановская // Вісник НТУ «ХП». Серія: Транспортне машинобудування. Харків: НТУ «ХП», 2017. № 5(1227). С. 108–134. Режим доступу: [http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2017\\_5.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2017_5.pdf)

17. Контактна взаємодія елементів штампного оснащення / М. А. Ткачук, О. А. Ищенко, Н. А. Дьоміна, М. М. Ткачук, А. В. Грабовський, В. В. Шеманська, Д. Р. Васильченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків: НТУ «ХП». 2018. № 41 (1317) С. 67–76. Режим доступу: ISSN 2519-2671.

18. Шеремет В.М. Теорія та практика моделювання фізико-механічних процесів у складних механічних системах / В.М. Шеремет, О.А. Ищенко, Г.В. Ткачук// Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XVII міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 20-22 травня 2009 р.). Ч. 1. Харків: НТУ «ХП», 2009. С. 256.

19. Контактное взаимодействие элементов штампов при выполнении технологической операции холоднолистовой штамповки / Ю.Д. Сердюк, Н.А. Демина, О.А. Ищенко, А.Ю. Танченко // Межд. науч.-техн. конф. «Университетская наука-2010»: Сб.тезисов

докладов в 3-х томах. Мариуполь: ПГТУ, 2010. Т. 1. С.203.

20. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния базовых плит разделительных штампов / Ю.Д. Сердюк, Н.А. Демина, О.А. Ищенко, А.Ю. Танченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали ХХ міжн. наук.-практ. конф. (15-17 травня 2012 р., Харків). Ч. 1. Харків: НТУ «ХП», 2012. С. 161.

21. Ищенко О.А. Контактное взаимодействие элементов штампов для разделительных операций / О.А. Ищенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХХІ міжнародної науково-практичної конференції (29–31 травня 2013 р., Харків). Ч. 1. Харків: НТУ «ХП», 2013. С. 202.

22. Обоснование рациональных параметров элементов разделительных штампов с привлечением комплексных расчетных моделей / О.А. Ищенко, Н.А. Демина, О.П. Назарова, А.В. Грабовский, Д.С. Мухин // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХХІІ міжнар. наук.-практ. конф. (21-23 травня 2014 р., Харків) / за ред. проф. Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО. Ч. 1. Харків: НТУ «ХП», 2014. С. 202.

23. Ищенко О.А. Расчет базовых плит разделительных штампов / О.А. Ищенко, А.В. Ткачук, А.В. Грабовский, Н.Н. Ткачук, Н.А. Демина // Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии» (18-20 ноября 2015 г., Харьков). Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. С. 25–28.

24. Комплексные расчетные модели элементов штампов для разделительных операций / О.А. Ищенко, Н.А. Демина, О.П. Назарова, Г.А. Кротенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХХІV міжнар. наук.-практ. конф. (18-20 травня 2016 р., Харків) / за ред. проф. Сокола Є. І. Ч. 1. Харків: НТУ «ХП», 2016. С. 194.

25. Ищенко О.А. Компьютерное моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки с применением параметрических моделей / О.А. Ищенко, Н.Н. Ткачук, Г.А. Кротенко, Н.А. Ткачук // Матеріали VIII Міжн. наук.-техн. конф. «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні і металургії» (23–25 листопада 2016 р., Харків). Харків, НТУ «ХП», 2016. С. 27–30.

26. Розв'язання задач аналізу контактної взаємодії складнопрофільних тіл та синтезу геометричної форми контактуючих поверхонь / О. В. Мартиненко, С. М. Лавриненко, М. М. Ткачук, А. В. Грабовський, О. А. Іщенко, Н. А. Дьоміна, О. П. Назарова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. ХХV міжн. наук.-практ. конф. MicroCAD-2018, 16–18 травня 2018 р.: у 4 ч. Ч. I. Харків: НТУ «ХП». С. 170.

### ***Додатково наукові результати дисертації відображені у роботах:***

1. Специализированная автоматизированная система и расчетно-экспериментальное исследование корпусных элементов станочных приспособлений для оснащения станков фрезерно-сверлильной группы / Н.А. Ткачук, И.В. Артемов, О.А. Ищенко, Г.Н. Ефимов // Вестник НТУ «ХП». Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – Харків: НТУ «ХП», 2006.

– №3. – С.152–164.

2. Анализ чувствительности прочностных и динамических характеристик машиностроительных конструкций на основе прямого возмущения конечно-элементных моделей / Н.А. Ткачук, А. Ю. Танченко, А.Н. Ткачук, П.В. Чурбанов, И.Я. Храмцова, О.А. Ищенко // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 22. – С. 147–169.

3. К вопросу о комплексных исследованиях прочностных и жесткостных характеристик элементов приспособлений рамной конструкции / М.М. Пеклич, А.Н. Ткачук, И.Я. Храмцова, А.В. Ткачук, О.А. Ищенко // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – № 3. – С. 88–100.

### **Особистий внесок автора в роботах, які опубліковані у співавторстві:**

[1, 9, 13, 21, 24] – постановка задач розрахунково-експериментального дослідження складних просторових конструкцій; [2, 4, 7, 12] – постановка задач математичного моделювання напружено-деформованого стану; [3, 8] – формування комплексних розрахункових моделей елементів штампів для розділових операцій [5, 23] – визначення силового впливу на елементи складних механічних систем; [6, 10, 14, 17] – дослідження контактної взаємодії елементів розділових штампів; [11] – обґрунтування експериментальних методів дослідження контактної взаємодії елементів штампового оснащення, аналіз та узагальнення одержаних результатів; [15, 16, 25–29] – постановка задач, розробка чисельних моделей, комп'ютерне моделювання контактної взаємодії ЕШО, аналіз та узагальнення одержаних результатів дослідження НДС елементів штампів; [22] – аналіз чутливості міцності і динамічних характеристик машинобудівних конструкцій; [23, 24] – розробка та чисельна реалізація структури досліджень НДС елементів технологічних систем.

### **АНОТАЦІЯ**

**Ищенко О.А. Обґрунтування проектно-технологічних параметрів розділових штампів шляхом підвищення міцнісних та жорсткісних характеристик основних елементів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском (13 – Механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2019. – Вчена спец. рада Донбаської державної машинобудівної академії, Краматорськ, 2019.

Дисертація спрямована на розв'язання актуальної та важливої для машинобудування, зокрема, стосовно процесів та машин обробки тиском, науково-технічної задачі забезпечення характеристик розділових штампів на основі дослідження міцності та жорсткості їхніх елементів на етапі проектування. Для дослідження напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення розроблена комплексна математична модель, яка, на відміну від відомих, дає можливість враховувати множинну контактну взаємодію елементів досліджуваних технологічних систем. Крім того, у цю модель інтегрована технологія параметричного моделювання, що дає можливість розв'язувати задачі синтезу на основі більш достовірних нелінійних задач аналізу.

Запропоновано підхід із застосуванням поповнюваної бази даних розрахунків напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення для обґрунтування їх-

ніх проектно-технологічних рішень. На відміну від спрощених розрахункових моделей або прямого багаторазового розв'язання задач у повній постановці, запропонований підхід забезпечує і точність, і оперативність розв'язання даних задач. Установлено, що при багатоконтактному сполученні набору елементів штампів, що є багатошаровою конструкцією, зони контактної взаємодії і розподілу контактного тиску практично не змінюються при збільшенні сил штампування, а розподіли і максимальні значення контактного тиску практично лінійно залежать від діючих сил штампування. На основі системного підходу виділено технологічні системи різного рівня складності, елементи яких із застосуванням та адаптацією методу параметричного моделювання набувають властивості варіативності проектно-технологічних параметрів, що, на відміну від традиційних підходів, дає можливість ставити і розв'язувати задачі їх обґрунтування за критеріями забезпечення експлуатаційних характеристик.

Обґрунтовано раціональні параметри розділових штампів. Результати досліджень впроваджені на машинобудівних підприємствах.

**Ключові слова:** розділовий штамп, напружено-деформований стан, міцнісні та жоркисні характеристики, множинна контактна взаємодія, базова плита, спеціалізований програмно-модельний комплекс.

## АННОТАЦИЯ

**Ищенко О.А. Обоснование проектно-технологических параметров разделительных штампов путем повышения прочностных и жесткостных характеристик основных элементов.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением (13 - Механическая инженерия). – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2019. – Ученый спец. совет Донбасской государственной машиностроительной академии, Краматорск, 2019.

Диссертация направлена на решение актуальной и важной для машиностроения, в частности, относительно процессов и машин обработки давлением, научно-технической задачи обеспечения характеристик разделительных штампов на основе исследования прочности и жесткости их элементов на этапе проектирования. Для исследования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки разработана комплексная математическая модель, которая, в отличие от известных, позволяет учитывать множественный контакт при взаимодействии элементов исследуемых технологических систем. Кроме того, в этой модели интегрирована технология параметрического моделирования, что позволяет решать задачи синтеза на основе более достоверных нелинейных задач анализа. Предложен подход с применением пополняемой базы данных расчетов напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки для обоснования их проектно-технологических решений. В отличие от упрощенных расчетных моделей или прямого многократного решения задач в полной постановке, предлагаемый подход обеспечивает и точность, и оперативность решения данных задач.

Установлено, что при многоконтатном сопряжении набора элементов штампів, являючихся многослойной конструкцией, зони контактної взаємодії та розподілу контактної тиску практично не змінюються при збільшенні сил штампування, а розподіли і максимальні значення контактної тиску практично лінійно залежать від діючих сил штампування. На основі системного підходу виділено технологічні системи різного рівня складності, елементи яких із застосуванням та адаптацією методу параметричного моделювання набувають властивості варіативності проектно-технологічних параметрів, що, на відміну від традиційних підходів, дає можливість ставити і розв'язувати задачі їх обґрунтування за критеріями забезпечення експлуатаційних характеристик.

лены технологические системы различного уровня сложности, элементы которых с применением и адаптацией метода параметрического моделирования приобретают свойства вариативности проектно-технологических параметров, что, в отличие от традиционных подходов, дает возможность ставить и решать задачи их обоснования по критериям обеспечения эксплуатационных характеристик.

Обоснованы рациональные параметры разделительных штампов. Результаты исследований внедрены на машиностроительных предприятиях.

**Ключевые слова:** разделительный штамп, напряженно-деформированное состояние, прочностные и жесткостные характеристики, множественное контактное взаимодействие, базовая плита, специализированный программно-модельный комплекс.

## ABSTRACT

**Ischenko O.A. Substantiation of project and technological parameters of shearing dies by improving of basic elements strength and rigidity.** – Manuscript copyright.

Thesis for a scientific degree of Candidate in Technical Sciences, specialty 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working (13 – Mechanical engineering). – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science in Ukraine, Kharkov, 2019. Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2019.

The dissertation is aimed to solve a scientific and technical problem which is relevant and important for machine building, specifically for processes and machines of plastic working. The solution created methods of providing properties for shearing dies which based on research their elements strength and stiffness at the design stage. A complex mathematical model has been developed for studying the stress-strain state of dies tooling elements. This made it possible to take into account the multiple contact interaction between elements of investigated technological systems. This differed the model from the mathematical models that already exist. In addition, the model was integrated with the technology of parametric modeling that enables to solve synthesis problems with more reliable nonlinear analysis tasks.

The approach relied on a constantly updatable database with calculation of the stress-strain state of dies tooling elements. The improvement made the design and technological decisions for dies tooling elements valid. The main limitations of existing approaches, which include simplified calculations or direct multidimensional problem solving, were insufficient accuracy and efficiency. The model under consideration decided the issue.

The approach for the first time we established that in case of a multi-touch connection of a die elements set the areas of contact interaction and distribution of contact pressure almost did not change when the stamp efforts increase. Also, crest values and contact-pressure distribution were linearly depend on functioning stamping efforts.

Refined dependencies for strength and stiffness properties of the shearing dies elements on the design and technological parameters were established as the results of numerous studies of their stress-strain state. In particular, it was found that variation of thickness and diameter of the failure hole of the stamp leads to a sharp increase in stresses and displacements of the base plate points while reducing the volume of the plate material

in comparison with the nominal rational values and to a slight decrease – with a significant increase in its volume. In this regard, it was advisable to choose the design parameters of dies elements in transition zone of the dependency of stresses and displacements from the varied parameters on the virtually horizontal plots to the plots of lift.

We have found that the lower natural oscillation frequencies, which were true for real range of variation in design parameters of dies tooling elements, were much higher than frequencies of forced efforts. As a result, it became possible to quasistatize the problem of determining the stress-strain state of dies tooling elements, and it has experimental confirmation. This gave an opportunity to intensify the process of numerical investigation at variation of the stamped details range dramatically. It was sufficient to solve the problem only once and determine the stress-strain state of the die tooling elements then extend the results to multitude of stamped parts by using a linear dependence on a punching force. This could change the calculating of numerous options at a design stage.

Technological systems of different levels complexity were allocated on the basis of a system approach. The elements of these systems acquired the properties of design and technological parameters variability during the application and adaptation of the parametric modeling method. Thus, we were able to set and solve the problems of justifying the values for these parameters by the criteria for ensuring operational characteristics.

The developed complex model was implemented in a software as a specialized program-model complex. It provided an opportunity for solving both single analysis tasks and entire series of ones in an automated mode. Such property differed the complex from the traditional computer modeling. In addition, it was also possible to complicate the level of computational models (to ‘build-up’ the composition and structure) sequentially. This opportunity was not available in traditional software packages. This made it possible to analyze the degree of reliability and the scope of regularities established on the base of the lower-level models. Namely, a high degree of reliability and a wide range of applications were provided in the case of qualitative and quantitative origin of the calculation results while using the upper-level model. Otherwise, the cycle of complication of models was repeated.

In particular, it was confirmed the pattern of the stamping force level influence (containing lower and upper base plates, pack, guide columns and press sub-plate) and design parameters for the contact pressure and contact areas on the level of stresses and displacements as well as dynamic characteristics of elements and a die in a whole on the top-level model.

**Key words:** shearing die, strain-stress state, strength and stiffness properties, multiple contact interaction, base plates, specialized program-model complex.





Підп. до друку 22.10.2019 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 1,16.  
Наклад 110 прим. Зам. № 4190

Віддруковано в ТОВ «Друкарня Мадрид»  
61024, м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11  
Тел.: (057) 756-53-25  
[www.madrid.in.ua](http://www.madrid.in.ua)      e-mail: [info@madrid.in.ua](mailto:info@madrid.in.ua)