

Динаміка та міцність машин

УДК 539.3

*Ищенко О.А., Ткачук М.А., д-р техн. наук; Грабовський А.В., канд. техн. наук;
Ткачук М.М., канд. техн. наук; Скріпченко Н.Б., канд. техн. наук; Мерецька К.О.*

КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ: МОДЕЛІ, ЗАКОНОМІРНОСТІ, КРИТЕРІЇ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ

Вступ. 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, із виготовленням штампів та ріжучих елементів. Вони повинні володіти високою точністю і стійкістю. З цією метою все більше застосування отримує переналагоджувана оснастка. Вона 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 переналагоджуваних штампів вимагають розробки адекватних, точних і економічних (з точки зору використовуваних обчислювальних ресурсів) математичних і чисельних моделей та методів розрахунку проектно-технологічних параметрів проєктованих штампів за критеріями міцності та жорсткості з урахуванням множинного контакту їхніх елементів.

У той же час існуючі аналітичні та чисельні методики розрахунку елементів штампової оснастки далеко не повною мірою відповідають висунутим вимогам. Зокрема, найбільш відчутним їх недоліком є не зовсім коректне урахування крайових умов у 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 елементів штампової оснастки (ЕШО) за критеріями забезпечення міцності і жорсткості. Розв'язання цієї задачі на прикладі штампів для вирубки-пробивання листового матеріалу складає напрямок досліджень, описаних у роботі.

Аналіз існуючих методів розрахунку напружено-деформованого стану та дослідження контактної взаємодії елементів штампового оснащення. Різні методи дослідження точнісних, жорсткісних, стійкісних, міцнісних характеристик елементів штампової оснастки наведені у роботах В.А. Тітова, І.С. Алієва, В.В. Драгобецького, О.Ф. Тарасова, О.Я. Мовшовича, Є.А. Фролова, Є.І. Заярненка та багатьох дослідників [1–14]. У той же час у цих роботах

© О.А. Іщенко, 2018

ключова компонента – контактна взаємодія – досліджена недостатньо повно. При цьому великий обсяг експериментальних даних не підкріплений чисельними дослідженнями. Це пояснюється недостатньо розвиненими засобами комп'ютерного моделювання, наявними у свій час у цих досліджень.

Певне уявлення про конструктивні особливості та розрахунок розділових штампів дає численна довідкова література, статті та дисертації [1–14]. Зокрема, як зазначається в [1, 9], на сьогоднішній день розроблена і впроваджена у виробництво система переналагоджуваних штампів, яка містить три основних типи конструкцій, що зберігають, однак, основний загальний принцип універсальності та варіативності: універсально-збірні переналагоджувані штампи (УЗПШ); спеціалізовані переналагоджувані штампи (СПШ); універсальні переналагоджувані штампи з механізованим кріпленням пакетів (УПШ-М).

У свій час в ДП «Харківський НДІ технології машинобудування» розроблені розділові переналагоджувані штампи різних габаритів. До комплекту універсально-збірних переналагоджуваних штампів входить один з семи типорозмірів розроблених універсальних блоків і десять відповідних переналагоджуваних пакетів багаторазового використання. Призначений для штампування деталей із листових матеріалів на підприємствах із багатонаменклатурним дрібносерійним і серійним характером виробництва. Закріплення інструменту в пакетах проводиться шляхом заливки посадочних частин пластмасами холодного затвердіння типу АСТ-Т з армуванням об'ємним металевим каркасом. Конструкція переналагоджуваних пакетів дає змогу легко діставати робочі елементи разом з пластмасовими держакми і замінювати їх новими, забезпечуючи багаторазове переналагоджування та використання пакета.

Аналіз результатів огляду літературних джерел дає підставу для наступних висновків.

1. Штампове оснащення є центральним елементом технологічної системи «прес – штамп – формуючі елементи – заготовка». Вона замикає на собі силові потоки у цій системі, має забезпечувати стійкість, міцність, жорсткість і точність виконання технологічних операцій. У зв'язку із цим необхідно визначати розрахунковим шляхом на перших етапах проектних розробок елементів штампової оснастки її НДС під дією зусиль штампування.

2. Аналіз розділових штампів для холоднолистового штампування дає можливість зробити висновок про те, що конструктивно вони складаються із набору контактуючих один з одним під дією зусиль штампування численних елементів блоків та пакетів. Для аналізу напружено-деформованого стану цих деталей штампів потрібно визначити контактний тиск, що діє між цими деталями, який, у свою чергу, залежить від НДС досліджуваних деталей. У результаті отримуємо пов'язану задачу про множинну контактну взаємодію та визначення НДС системи пружних деформованих тіл.

3. Серед усієї сукупності аналітичних і чисельних методів розв'язання задач про контактну взаємодію найбільш доцільним є поєднання можливостей методу скінченних елементів і узагальненого параметричного моделювання. Таке поєднання дає можливість інтегрувати різні параметри у математичну і чисельну модель НДС, зокрема, елементів штампового оснащення, а, відповідно, розв'язувати задачі синтезу, тобто обґрунтування проектно-технологічних параметрів за критеріями стійкості, міцності, жорсткості і точності виконання технологічних операцій штампування.

Як узагальнюючий можна зробити висновок про те, що на теперішній час задача розробки методів аналізу напружено-деформованого стану ЕШО із урахуванням контактної взаємодії та обґрунтування на цій основі раціональних проектно-технологічних рішень при проектних дослідженнях штампів вирішена не повною мірою.

Таким чином, проведений аналіз дав підстави зробити висновок про актуальність і важливість поставленої задачі та визначити завдання досліджень.

Метою роботи є створення удосконалених методів розрахунку міцнісних і жорсткісних характеристик елементів штампової оснастки для обґрунтування їх проектно-

технологічних параметрів за критеріями міцності, жорсткості, стійкості та точності виконання технологічних операцій.

Це передбачає, в свою чергу, вирішення наступних завдань: проведення огляду сучасного стану методів розрахунку штапкової оснастки, проектно-технологічних рішень на прикладі розділових штампів (РШ); розробка вдосконаленої математичної моделі НДС елементів РШ з урахуванням множинної контактної взаємодії, а також інтеграція у неї варійованих і контрольованих параметрів, створення удосконалених чисельних моделей НДС контактуючих елементів досліджуваних штампів для розділових операцій на основі розробленої математичної моделі; розв'язання прикладних задач дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів на міцність і жорсткість елементів штапкової оснастки, аналіз та узагальнення виявлених фізичних особливостей у розподілі компонент НДС; розрахунково-експериментальні дослідження НДС і контактної взаємодії елементів розділових штампів та розробка обґрунтованих рекомендацій щодо вибору конструктивних і технологічних параметрів штампів.

Математична модель напружено-деформованого стану елементів штапкової оснастки. 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, σ – вектор переміщень і тензор напружень елементів штапкового оснащення, f – масив зовнішніх навантажень, t – час, а p – масив узагальнених параметрів; саме вони визначають варіативність геометричної форми, розмірів, властивостей матеріалу ЕШО, саме завдяки їм вдається проводити різноманітні дослідження для обґрунтування раціональних параметрів РШ.

У розгорненому вигляді співвідношення для визначення НДС ЕШО мають вигляд:

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

Тут $*,_{,i} = \partial*/\partial x_i$ – похідна за координатою 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 , ε_{ij} , σ_{ij} – компоненти вектора переміщень точок досліджуваних 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 індексом).

На відміну від класичних, є крайові умови на поверхнях S_C (з номерами s та g) можливого контакту із зазорами δ_{sg} :

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

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 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 із величезним масивом скла-

дних задач. Відповідно, різко зростають вимоги до часу і обчислювальних ресурсів. У той же час ці дослідження потрібно проводити оперативно. У результаті стикаємося з центральним протиріччям методологічного плану.

Для розв'язання цієї суперечності були проведені теоретичні розробки у двох напрямках. Перший відноситься до поведінки розв'язку варіаційної задачі. Дійсно, розглянувши задачу мінімізації функціонала повної внутрішньої енергії

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

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) при нульових δ_{sg} , можна прийти до наступного висновку: якщо за якимось параметром досягається безумовний мінімум, то він зміститься в

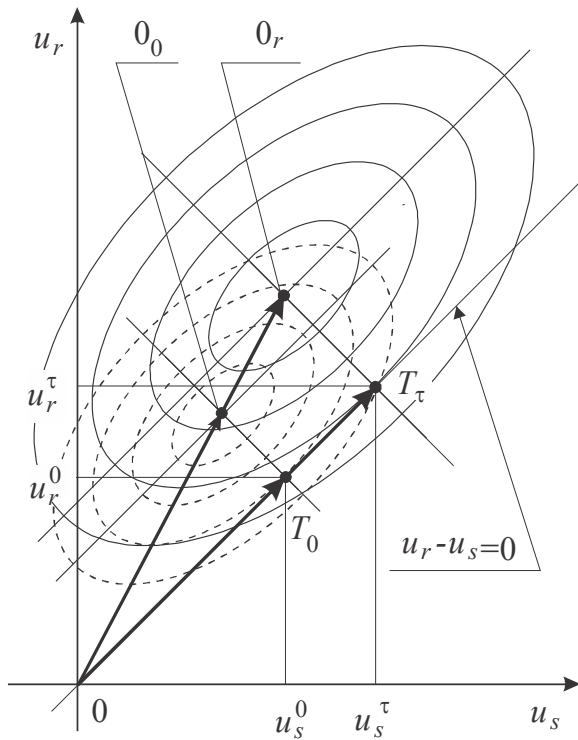


Рисунок 1 – Лінії рівня функції I в перерізі $u_r - u_s$

k раз при зміні зусилля штампування в k раз; якщо ж ми потрапили на обмеження за якимось параметром, то ми там і залишимося, теж змістившись в k разів порівняно із початковим значенням (рис. 1). Таким чином, отримуємо, що з ростом зусиль штампування зона контакту не змінюється, закон розподілу контактного тиску залишається стабільним, а компоненти НДС прямо йому пропорційні. Це дуже важливий результат, тому що дає можливість різко скоротити обсяги чисельних досліджень при збереженні їхньої точності.

Другий напрямок відноситься до часового розподілу компонент НДС. Дійсно, процес штампування за самою своєю суттю є динамічним. Для визначення значущості вкладу інерційних елементів необхідно зіставити частоту збурення від $P_{шт}$ із власними частотами коливань ЕШО. Для цього, відштовхуючись від скінченно-елементного формулювання

$$M\ddot{X} + CX = 0, \quad (7)$$

де M, C – матриця мас і жорсткості, а X – вектор вузлових змінних, що описує стан досліджуваного об'єкта, слід розв'язати задачу про власні частоти ω_i та власні форми коливань λ_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 базових плит, блоків і штампів у зборі $\nu = 1/T \ll \nu_1 = 1/T_1$. Таким чином, обґрунтовується квазістатична постановка задачі. У результаті запропоновано теоретичні основи аналізу НДС ЕШО із урахуванням не одиничного, а множинного контакту для забезпечення необхідних характеристик міцності, жор-

сткісних, стійкісних і точнісних характеристик РШ.

Створені математичні моделі знайшли свою реалізацію у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу (СПМК), представленого на рис. 2. Він з'єднує, з одного боку, спеціальні модулі, а з іншого, – універсальні пакети типу SolidWorks, Creo, ANSYS.

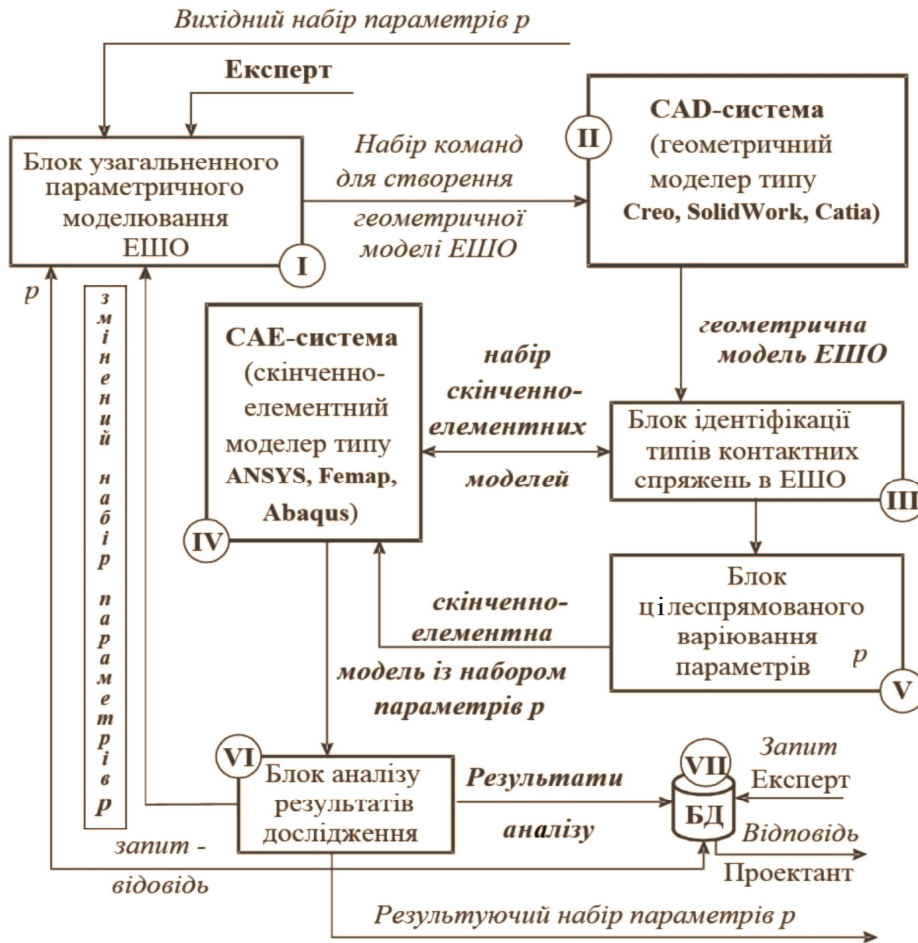


Рисунок 2 – Структура СПМК для дослідження НДС ЕШО із урахуванням контактної взаємодії

Результати розв'язання прикладних задач. У першу чергу були досліджені власні частоти (ВЧК) і власні форми коливань (ВФК) нижніх базових плит, а також блоків РПШ у зборі. Зіставлення спектрів ВЧК і ВФК (рис. 3, 4) з частотою навантаження і видом навантаження однозначно підтверджує можливість і правомірність квазістатичної постановки задачі аналізу НДС ЕШО.

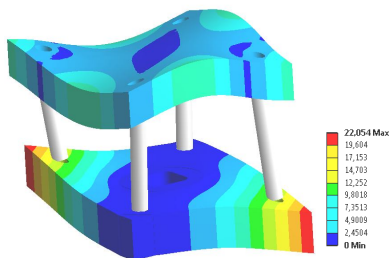


Рисунок 3 – Приклад ВФК блока штампа із частотою 4,24 кГц (Shell-конструктиви)

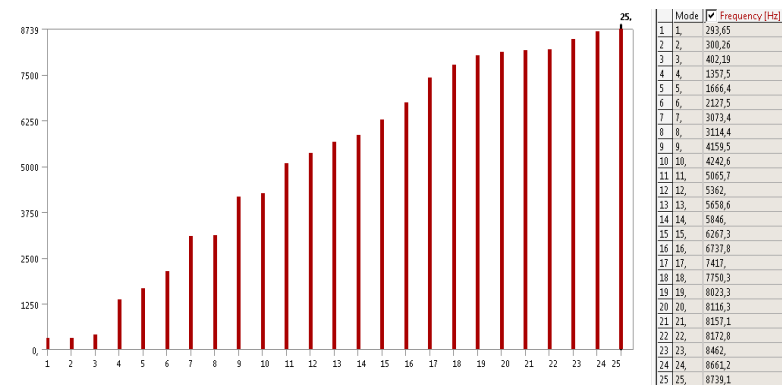


Рисунок 4 – Спектр ВЧК (Гц) блока штампа (Shell-конструктиви)

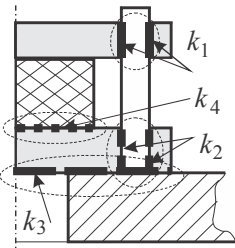
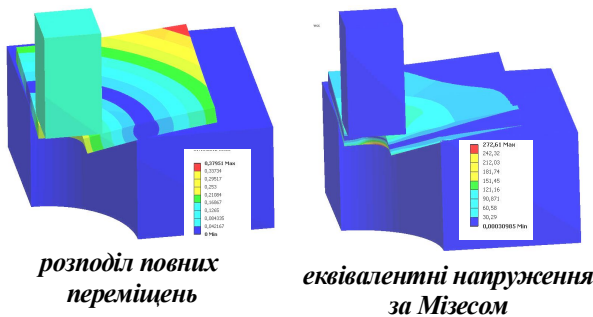


Рисунок 5 – Елементи досліджуваної технологічної системи та відповідні характерні зони контактної взаємодії

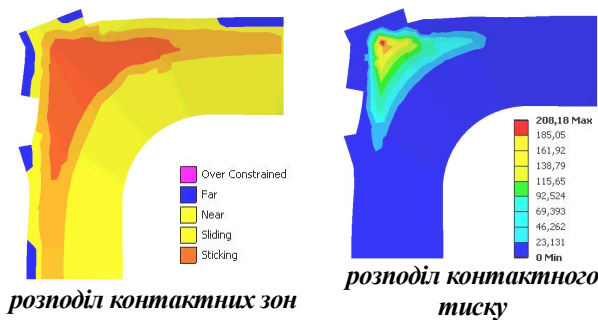
Далі були розв'язані задачі про контактну взаємодію ЕШО у різних постановках (рис. 5). Зокрема, досліджено вплив товщини нижньої базової плити та діаметра провального отвору у підштамповій плиті преса на контактний тиск, напруження і переміщення. Встановлено такі закономірності (рис. 6–8): напруження в елементах цієї підсистеми концентруються в зонах їх механічного контакту; напруження і контактний тиск розподіляються на площах контактного сполучення нерівномірно; інтегральні залежності характеристик НДС від варійованих параметрів (у цьому випадку – товщина базової плити і діаметр провального отвору) відповідають «гіперболічному» характеру поведінки (рис. 8, різке зростання при убаванні обсягу матеріалу деталі нижче певної межі, практично незмінна величина – при зростанні цього обсягу вище деякої іншої межі та плавну зміну у перехідному діапазоні). Також встановлено особливості контактної взаємодії напрямних колонок із запресовкою та із заливкою епоксидним компаундом в отвір у нижній базової плиті (рис. 9).



розподіл повних переміщень

еквівалентні напруження за Мізесом

Рисунок 6 – Результати дослідження НДС елементів штамп



розподіл контактних зон

розподіл контактного тиску

Рисунок 7 – Результати дослідження НДС елементів штамп у сполученні змінного пакету та базової плити

Рисунок 9 – Моделі взаємодії направляючої колонки з нижньою базовою плитою штамп: а – геометрична, б – скінченно-елементна

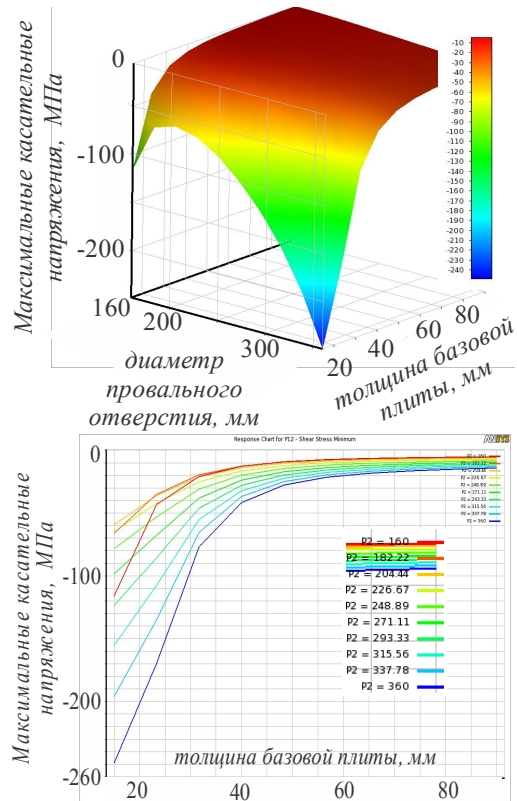
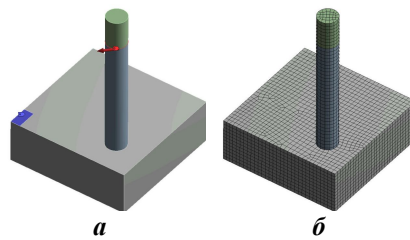


Рисунок 8 – Залежності характеристик НДС від варійованих параметрів: зміна мінімальних (максимальних за величиною) догичних напружень у базовій плиті штамп

Як видно з представлених графіків і розподілів (рис. 10, 11), для випадку запресовки спостерігаються такі закономірності: найбільш навантаженими від горизонтальних зусиль зонами є області, що примикають до з'єднання колонок з плитами;

контактний тиск у сполученні «колонка – плита» розподіляється нерівномірно, і чим менше натяг, тим більше ця нерівномірність; для випадку з'єднання епоксидною смолою: напруження у цьому випадку набагато нижчі, ніж у разі посадки колонок із натягом; переміщення колонок від дії горизонтальних зусиль вищі, ніж у разі посадки колонок з натягом; розподіл напружень у шарі клейового компаунда після полімеризації та прикладання навантаження у разі посадки колонок з натягом нерівномірний за висотою; незважаючи на більш низький рівень напружень, слід враховувати 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 усіх змінних параметрів носять приблизно лінійний характер.

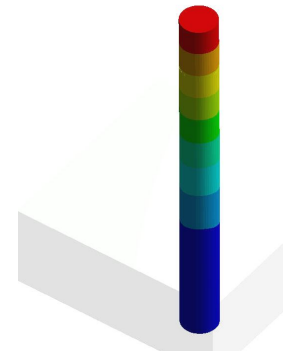


Рисунок 10 – Розподіл повних переміщень у колонці штамп

На завершення на більш докладній моделі напружено-деформованого стану блоку РПШ досліджено в комплексі поведінку штамп у зборі (рис. 12).

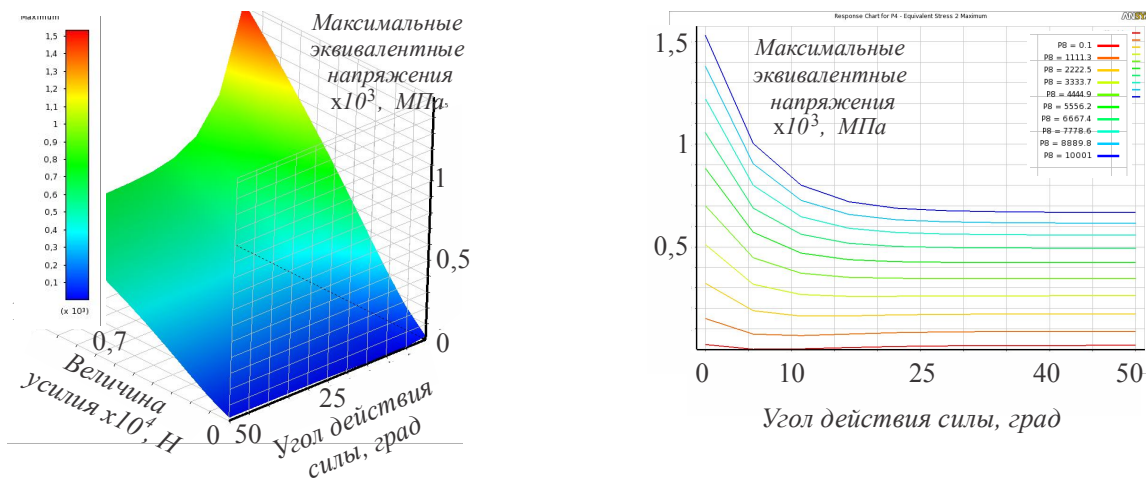


Рисунок 11 – Залежність максимальних еквівалентних напружень від параметрів p_1, p_2

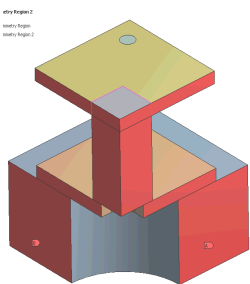


Рисунок 12 – Розділовий штамп: геометрична модель

Як впливає з аналізу отриманих результатів, напружено-деформований стан цієї підсистеми має ті ж особливості, що були встановлені на частинних моделях. Дійсно, підтверджені закономірності (рис. 13), а саме щодо істотно нерівномірного розподілу контактного тиску у сполученнях елементів штампового оснащення, цілком і повністю підтверджуються. Те ж можна сказати і про розподіл повних переміщень, еквівалентних напружень за Мізесом (рис. 14–17).

З усієї системи можна виокремити картини напружено-деформованого стану окремих елементів (див. рис. 13–17). 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. 18 наведені отримані інтегральні залежності. Видно, що із задовільною для практики точністю (похибка становить близько 2,5%) відзначена властивість контактної взаємодії окремих ЕШО та про значні рівні пружних переміщень.

Таким чином, можна зробити висновок, що якісну картину розподілу компонент напружено-деформованого стану можна проаналізувати за результатами дослідження більш повної моделі штамп, 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 отриманих результатів і складності створюваних моделей.

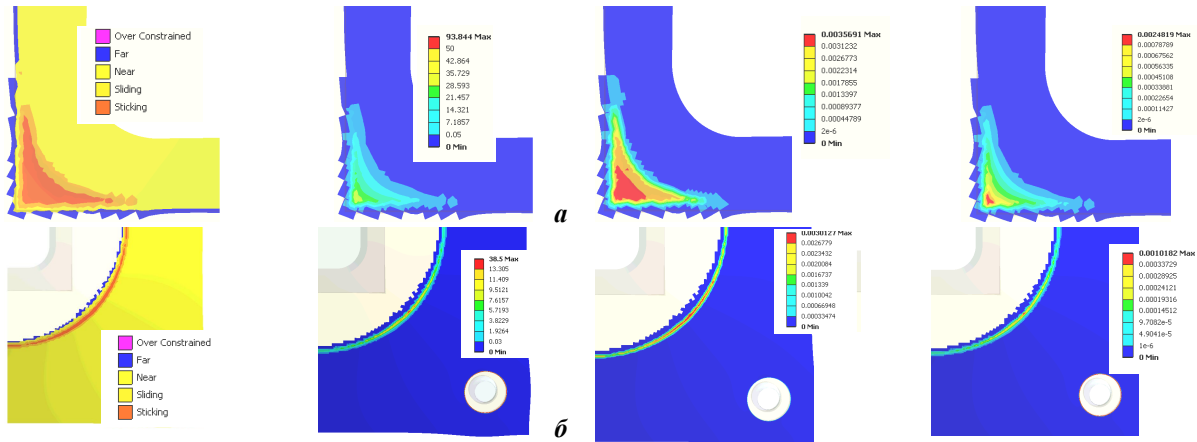


Рисунок 13 – Картини розподілу контактного тиску у зонах: $a - k_4$, $b - k_3$ ($P_{шт} = 10$ кН) (див. рис. 5)

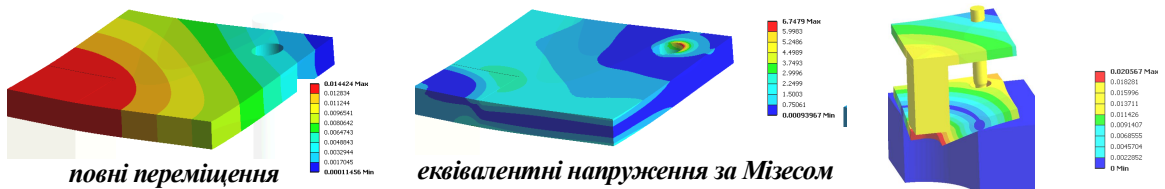


Рисунок 14 – Картини розподілу компонент НДС у верхній базовій плиті ($P_{шт} = 10$ кН)

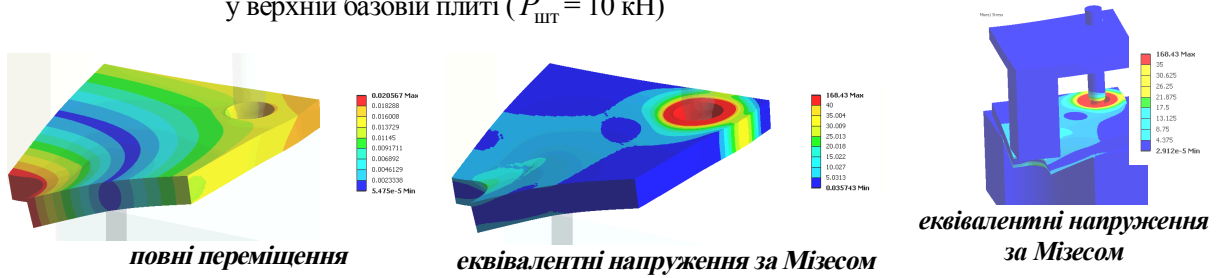


Рисунок 16 – Картини розподілу компонент НДС у нижній базовій плиті ($P_{шт} = 10$ кН)

Рисунок 15 – Картини розподілу компонент НДС ($P_{шт} = 10$ кН)

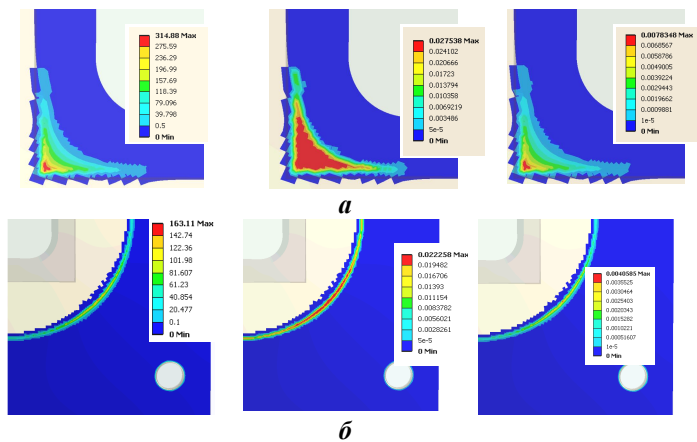


Рисунок 17 – Картини розподілу контактного тиску у зонах: $a - k_4$, $b - k_3$ ($P_{шт} = 100$ кН)

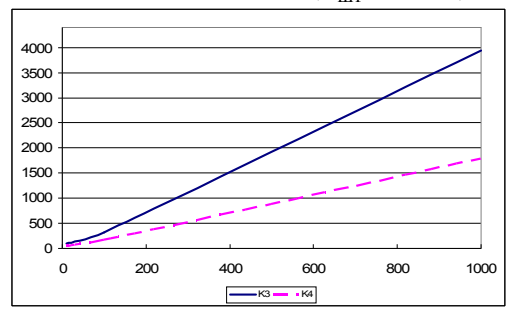


Рисунок 18 – Залежність максимальних контактного тиску (кПа) у сполученнях від величини зусилля штампування (кН) у зонах k_4 , k_3 (див. рис. 5)

Результати експериментальних досліджень. Для обґрунтування точності одержуваних чисельно результатів дослідження напружено-деформованого стану елементів технологічної оснастки вони були зіставлені із даними експериментальних досліджень. При цьому були використані як дані, отримані іншими дослідниками, так і одержувані у ході самостійно проведених експериментів результати. Зокрема, були залучені результати досліджень напружено-деформованого стану базових плит методом спекл-голографічної інтерферометрії, тензометрії і контактних відбитків. Із зіставлення чисельно і експериментально отриманих результатів випливає, що вони знаходяться у повній якісній та задовільній кількісній відповідності (рис. 19, 20). Похибка становить 10-15%.



Рисунок 19 – Загальний вигляд стенду

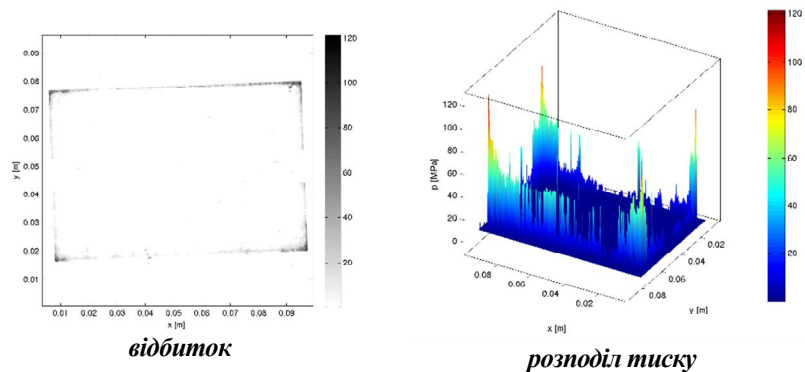


Рисунок 20 – Результати дослідження взаємодії макета пакета із базовою плитою (HSMS плівка):
площа поверхні – 358.08 мм², $P = 5938.11$ Н, $p_{\max} = 121.21$ МПа

Таким чином, можна зробити висновок, що чисельні результати, отримані із застосуванням створених і описаних у дисертаційній роботі скінченно-елементних моделей, знаходяться у задовільній відповідності до експериментально отриманих даних, причому як у ході власних, так і у ході випробувань, проведених іншими дослідниками.

Аналіз результатів досліджень. Отримані результати служать як основа при обґрунтуванні раціональних проектно-технологічних рішень розділових штамтів.

Що стосується вимог до стійкості, міцності, жорсткості і точності виконання технологічних операцій, то вони безпосередньо залежать:

– стійкість і міцність – від рівня напружень в основних, найбільш навантажених елементах штампового оснащення $\sigma_3^{\max} \leq [\sigma]$,

– жорсткість і точність штампування – від рівня переміщень і поворотів ЕШО $w_{\max} \leq [w]$; $w'_{\max} \leq [w']$.

Перевагою цього підходу (порівняно із 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.

Таким чином, розроблено новий підхід до забезпечення точності та стійкості виконання технологічних операцій вирубування-пробивання за рахунок створення більш адекватних, точних і оперативних методів розрахунку НДС елементів РШ, а також їх удосконалення моделей із урахуванням впливу множинної контактної взаємодії. При цьому отримані наступні результати.

1. Розроблена більш досконала комплексна математична модель НДС елементів штампового оснащення з урахуванням множинної контактної взаємодії, що відрізняється від раніше розроблених тим, що в неї безпосередньо інтегровані, з одного боку, варійовані проектно-

технологічні параметри штампів, а з іншого, – контрольовані міцнісні та жорсткісні характеристики; це дає можливість, на відміну від традиційних методик, шляхом багатоваріантних розрахункових досліджень визначати їх взаємозалежність, а, відповідно, безпосередньо обґрунтовувати раціональні технічні рішення при проектуванні штампів для розділових операцій.

2. Вперше встановлено, що при багатоконтактному сполученні набору елементів РШ, що є багатощаровою конструкцією, зони контактної взаємодії і розподілу контактного тиску практично не змінюються при збільшенні зусиль штампування, а розподіли і максимальні значення контактного тиску практично лінійно залежать від діючих зусиль штампування.

3. За результатами чисельних досліджень НДС елементів розділових штампів встановлені уточнені залежності їх міцнісних і жорсткісних характеристик від проектно-технологічних параметрів. Зокрема, виявлено, що 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 падіння – при істотному його зростанні. У зв'язку із цим доцільно вибирати проектні параметри елементів штампів у зоні переходу залежностей напружень і переміщень від варійованих параметрів від практично горизонтальних ділянок до ділянок підйому.

4. Виявлено, що для реального діапазону варіювання проектних параметрів елементів штампового оснащення нижні власні частоти коливань набагато вищі від частот дії змушуючих зусиль. У результаті встановлена можливість квазістатичної постановки задачі визначення НДС елементів штампового оснащення, що знайшло своє експериментальне підтвердження. Це надає можливість різко інтенсифікувати процес чисельних досліджень при варіюванні номенклатури штампованих деталей. Замість множини розрахункових варіантів на етапі проектування досить один раз розв'язати задачу визначення напружено-деформованого стану ЕШО, а потім поширити отримані результати на множину штампованих деталей шляхом використання лінійної залежності від зусилля штампівки.

5. Вперше встановлено, що при фіксації напрямних колонок і втулок у базових плитах переналагоджуваних штампів за допомогою полімерних компаундів у тонких з'єднувальних шарах, які утворюються при дії експлуатаційних навантажень, реалізується складний напружений стан з різкими градієнтами напружень; у зв'язку з цим критичні значення експлуатаційних навантажень у 2,0-2,5 рази нижче, ніж визначаються за спрощеним аналітичними виразами, або приблизно на рівні, який визначається дослідним шляхом, наприклад, при випресовці закріплених елементів із посадочних отворів плит.

Отримані результати служать основою для створення спеціалізованої комплексної бази даних, де збирається інформація про дослідження НДС елементів штампового оснащення при різних проектно-технологічних параметрах. Це дає можливість оперативно обґрунтувати основні параметри при проектуванні штампів із забезпеченням необхідної точності й стійкості при виконанні технологічних операцій. Крім того, розроблена структура СПМК, який володіє можливістю проводити уточнений аналіз НДС елементів штампів (перевірочний розрахунок) на заключних етапах проектних розробок. Цим самим скорочується обсяг доводочних робіт, а, відповідно, вартість проектування та виготовлення штампового оснащення в цілому.

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 стані проектних досліджень. Розв'язано низку задач та отримані на цій основі нові наукові результати, які дають підставу для наступних висновків.

1. 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.

2. Для дослідження НДС ЕШО 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.

3. Розроблена комплексна модель отримала програмну реалізацію у СПМК, який, на відміну від традиційних засобів комп'ютерного моделювання, надає можливості вирішення не лише одиничних задач аналізу, але й цілих їх серій у автоматизованому режимі. Крім того, забезпечується також відсутня у традиційних комп'ютерних пакетах можливість послідовного ускладнення («наращення» складу і структури) рівня розрахункових моделей. Це створює можливість аналізу ступеня достовірності та області застосування закономірностей, установлених 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. Зокрема, на моделі верхнього рівня (що містить нижню та верхню базові плити, пакет, напрямні колонки і підштампову плиту преса) підтверджені закономірності впливу рівня зусиль 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.

4. На основі аналізу спектру частот коливань елементів РШ обґрунтовано можливість квазістатичної постановки задачі аналізу НДС ЕШО. Крім того, для системи контактуючих за узгодженими поверхнями елементів розділових штампів установлена справедливості лінійної залежності рівня контактного тиску від зусилля штампування та практично незмінності площадки контакту при їх зміні. Установлені закономірності дають можливість, на відміну від традиційних підходів, проводити не одиничне розв'язання задач аналізу НДС, а групове – для цілої серії матеріалів, товщин та параметрів штампованих деталей.

5. Шляхом розв'язання низки прикладних задач контактної взаємодії ЕШО встановлені закономірності впливу множини варійованих 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 НДС. 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). 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 штампів практично за лінійною залежністю. Установлені залежності, отримані в ході багатоваріантних розрахункових досліджень, що накопичуються в спеціалізованих базах даних, є основою для прийняття проектно-технологічних рішень для розділових штампів.

6. Експериментальні дослідження в цілому підтверджують установлені розрахунковим 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 10-15%. При цьому спостерігається повна відповідність тенденцій зміни компонент НДС при варіюванні проектно-технологічних параметрів досліджених штампів.

Запропоновані в роботі підходи, розроблені моделі, встановлені закономірності можуть бути використані в ході наукових досліджень, а також проектних розробок і виготовлення розділових штампів для листоштампувального виробництва з високими експлуатаційними характеристиками стійкості та точності та при забезпеченні їх міцності та жорсткості.

Литература: 1. Заярненко Е. И. Разработка математических моделей и расчеты на прочность разделительных переналаживаемых штампов: дисс... доктора. техн. наук: спец. 01.02.06 и 05.03.05 / Заярненко Евгений Иванович. – Харьков, 1992. – 280 с. 2. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением / В. А. Евстратов. – Харьков: Вища школа, 1981. – 248 с. 3. Островский В. П. Справочник конструктора по холодной штамповке / В. П. Островский. – М. : Машигиз, 1957. – 287 с. 4. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л. : Машиностроение, 1979. – 520 с. 5. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1968. – 283 с. 6. Каргин Б. С. Исследование напряженно-деформированного состояния в зоне прижимного кольца при штамповке детали «днище» / Каргин Б. С., Липчанский А. А. // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДДМА, 2014. – № 2 (39). – С. 129-133. 7. Фролов Е. А. Экспериментальное исследование напряженного состояния блоков универсально-сборных переналаживаемых штампов методом голографической интерферометрии / Фролов Е. А., Агарков В. В., Корнеев С. В. // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 3 (32). С. 218-223. 8. Короткий С. О. Удосконалення процесів одержання листових деталей з буртом на основі використання способу сполученого формування-пробивання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском» / Короткий С. О. –Краматорськ, 2010. – 20 с. 9. Дьоміна Н.А. Удосконалення методів розрахунку елементів штампного оснащення на основі аналізу їх напружено-деформованого стану: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском» / Н. А. Дьоміна –Харків, 2011. – 20 с. 10. Исследование точности изготовления и сборки блоков специализированных переналаживаемых штампов для гибки деталей / Мовшович А. Я., Жолткевич Н. Д., Резниченко Н. К., Кочергин Ю. А., Буденный М. М. // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – 43. – С. 135– 140. 11. Фролов Е. А. Разработка математических моделей силового взаимодействия базовых элементов универсально-сборных штампов / Е. А. Фролов, А. Я. Мовшович, В. В. Агарков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2011. – № 49. – С. 208–215. 12. Мовшович А. Я. Конструкции и технологические возможности специализированных гибочных штампов // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування». – № 60. – С. 250–254. 13. Тарасов А. Ф. Влияние конструкции штампа на деформацию элементов штампного блока и рабочего инструмента штампа / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 2. – С. 34–37. 14. Корнилова А. В. Разработка методов обеспечения долговечности силовых деталей кузнечно-прессовых машин и инструмента: дисс... доктора техн. наук: спец. 05.03.05 / Корнилова Анна Владимировна. – Москва, 2009. – 314 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zayarnenko E. I. Razrabotka matematicheskikh modelej i raschety na prochnost' razdelitel'nyh perenalazhivaemyh shtampov: diss... doktora. tekhn. nauk: spec. 01.02.06 i 05.03.05 / Zayarnenko Evgenij Ivanovich. – Har'kov, 1992. – 280 s. 2. Evstratov V.A. Teoriya obrabotki metallov davleniem / V. A. Evstratov. – Har'kov: Vishcha shkola, 1981. – 248 s. 3. Ostrovskij V. P. Spravochnik konstruktora po holodnoj shtampovke / V. P. Ostrovskij. – M. : Mashgiz, 1957. – 287 s. 4. Romanovskij V. P. Spravochnik po holodnoj shtampovke / V. P. Romanovskij. – L. : Mashinostroenie, 1979. – 520 s. 5. Popov E. A. Osnovy teorii listovoj shtampovki / E. A. Popov. – M. : Mashinostroenie, 1968. – 283 s. 6. Kargin B. S. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v zone prizhimmogo kol'ca pri shtampovke detali "dnishche" / Kargin B. S., Lipchanskij A. A. // Obrabotka materialov davleniem. – Kramatorsk: DDMA, 2014. – № 2 (39). – S. 129-133. 7. Frolov E. A. EHksperimental'noe issledovanie napryazhennogo sostoyaniya blokov universal'no-sbornykh perenalazhivaemyh shtampov metodom golograficheskoy interferometrii / Frolov E. A., Agarkov V. V., Korneev S. V. // Obrabotka materialov davleniem. – 2012. – № 3 (32). S. 218-223. 8. Korotkij S. O.

Udoskonalennya procesiv oderzhannya listovih detalej z burtom na osnovi vikoristannya sposobu spoluchenogo formuvannya-probivannya: avtoref. dis. na здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: spec. 05.03.05 "Procesi ta mashini obrobki tiskom" / Korotkij S. O. –Kramators'k, 2010. – 20 s. 9. D'omina N.A. Udoskonalennya metodiv rozrahunku elementiv shtampovogo osnashchennya na osnovi analizu ih napruzhenno-deformovanogo stanu: avtoref. dis. na здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: spec. 05.03.05 "Procesi ta mashini obrobki tiskom" / N. A. D'omina – Harkiv, 2011. – 20 s. 10. Issledovanie tochnosti izgotovleniya i sborki blokov specializirovannyh perenalazhivaemyh shtampov dlya gibki detalej / Movshovich A.YA., ZHoltkevich N.D., Reznichenko N. K., Kochergin YU. A., Budennyj M. M. // Vestnik NTU "HPI". – 2010. – 43. – S. 135– 140. 11. Frolov E. A. Razrabotka matematicheskikh modelej silovogo vzaimodejstviya bazovyh ehlementov universal'no-sbornykh shtampov / E. A. Frolov, A. YA. Movshovich, V. V. Agarkov // Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii. – 2011. – № 49. – S. 208–215. 12. Movshovich A. YA. Konstrukcii i tekhnologicheskie vozmozhnosti specializirovannyh perenalazhivaemyh gibochnykh shtampov // Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu Ukraini "Kiivs'kij politekhnichnij institut". Seriya "Mashinobudivannya". – № 60. – S. 250–254. 13. Tarasov A. F. Vliyanie konstrukcii shtampa na deformaciyu ehlementov shtampovogo bloka i rabocheho instrumenta shtampa / A. F. Tarasov, S. A. Korotkij // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 2006. – № 2. – S. 34-37. 14. Kornilova A. V. Razrabotka metodov obespecheniya dolgovechnosti silovykh detalej kuznechno-pressovykh mashin i instrumenta: diss... doktora tekhn. nauk: spec. 05.03.05 / Kornilova Anna Vladimirovna. – Moskva, 2009. – 314 s.

Ищенко О.А., Ткачук М.А., Грабовський А.В., Ткачук М.М., Скрипченко Н.Б., Мерецька К.О.

**КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ:
МОДЕЛІ, ЗАКОНОМІРНОСТІ, КРИТЕРІЇ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ**

Для дослідження напружено-деформованого стану елементів штампової оснастки розроблена комплексна математична модель, яка 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. За результатами чисельних досліджень напружено-деформованого стану елементів штампів установлені уточнені залежності їхніх міцнісних і жорсткісних характеристик від проектно-технологічних параметрів.

Ищенко О.А., Ткачук Н.А., Грабовский А.В., Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б., Мерецкая К.А.

**КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ:
МОДЕЛИ, ЗАКОНОМЕРНОСТИ, КРИТЕРИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ**

Для исследования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки разработана комплексная математическая модель, которая дает возможность учитывать множественное контактное взаимодействие элементов исследуемых технологических систем. Кроме того, в эту модель интегрирована технология параметрического моделирования, что позволяет решать задачи синтеза на основе более достоверных нелинейных задач анализа. По результатам многочисленных исследований напряженно-деформированного состояния элементов штампов установлены уточненные зависимости их прочностных и жесткостных характеристик от проектно-технологических параметров.

O. Ishchenko, M. Tkachuk, A. Grabovskiy, M. Tkachuk, N. Skripchenko, K. Meretska

**CONTACT INTERACTION OF ELEMENTS SEPARATE STAMPS:
MODELS, LEGISLATION, CRITERIA OF DESIGN SOLUTIONS**

To study the stress-strain state of the elements of the die tooling, a complex mathematical model has been developed that makes it possible to take into account the multiple contact interaction of the elements of the technological systems under study. In addition, the technology of parametric modeling is integrated into this model, which allows solving synthesis problems on the basis of more reliable non-linear analysis problems. Based on the results of numerous studies of the stress-strain state of the elements of dies, the exact dependences of their strength and stiffness characteristics on the design parameters have been established.