

УДК 539.3

**М. А. ТКАЧУК, О. А. ИЩЕНКО, Н. А. ДЬОМИНА, М. М. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ,
В. В. ШЕМАНСКА, Д. Р. ВАСИЛЬЧЕНКО**

КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ШТАМПОВОГО ОСНАЩЕННЯ

Робота спрямована на розв'язання актуальної та важливої для машинобудування, зокрема, стосовно процесів та машин обробки тиском, науково-технічної задачі забезпечення характеристик розділових штамів 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 поповненої бази даних розрахунків напружено-деформованого стану елементів штампової оснастки для обґрунтування їхніх 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 штамів, що є багатопаровою конструкцією, зони контактної взаємодії і розподілу контактної тиску практично не змінюються при збільшенні сил штампування, а розподіли і максимальні значення контактної тиску практично лінійно залежать від діючих сил штампування. За результатами чисельних досліджень напружено-деформованого стану елементів розділових штамів установлені уточнені залежності їхніх міцнісних і жорсткісних характеристик від проектно-технологічних параметрів.

Ключові слова: розділовий штамп, напружено-деформований стан, штампувальне оснащення, контактна взаємодія, метод скінченних елементів.

**Н. А. ТКАЧУК, О. А. ИЩЕНКО, Н. А. ДЕМИНА, Н. Н. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСКИЙ,
В. В. ШЕМАНСКАЯ, Д. Р. ВАСИЛЬЧЕНКО**

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

Работа 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, дает возможность учитывать множественное контактное взаимодействие элементов исследуемых технологических систем. Кроме того, в эту модель интегрирована технология параметрического моделирования, которая дает возможность 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 многоконтактном соединении набора элементов штампов, которые являются многослойной конструкцией, зоны контактного взаимодействия и распределения контактного давления практически не изменяются при увеличении сил штампования, а распределения и максимальные значения контактного давления практически линейно зависят от действующих сил штампования. По результатам численных исследований напряженно-деформированного состояния элементов разделительных штампов установлены уточненные зависимости их прочностных и жесткостных характеристик от проектно-технологических параметров.

Ключевые слова: разделительный штамп, напряженно-деформированное состояние, штамповочная оснастка, контактное взаимодействие, метод конечных элементов.

**М. А. ТКАЧУК, О. А. ИЩЕНКО, Н. А. ДЬОМИНА, М. М. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСКИЙ,
В. В. ШЕМАНСКА, Д. Р. ВАСИЛЬЧЕНКО**

CONTACT INTERACTION ELEMENTS STAMPING TOOL

The work is aimed at solving actual and important for mechanical engineering, in particular, regarding the processes and machines of pressure treatment, the scientific and technical task of ensuring the characteristics of separation dies based on the study of the strength and rigidity of their elements at the design stage. To study the stress-strain state of the elements of die tooling, a complex mathematical model has been developed, which, unlike the well-known ones, makes it possible to take into account the multiple contact interaction of the elements of the technological systems under study. In addition, the parametric modeling technology is integrated into this model, which makes it possible to solve synthesis problems on the basis of more reliable nonlinear analysis problems. An approach is proposed with the use of a replenished database of calculations of the stress-strain state of elements of die tooling to substantiate their design and technological solutions. Unlike the simplified computational models or the direct multiple solution of problems in a complete formulation, the proposed approach ensures both the accuracy and efficiency of solving these problems. It has been established that with a multi-contact connection of a set of stamp elements that are multi-layered, the areas of contact interaction and contact pressure distribution do not practically change with increasing pressing forces, and the distribution and maximum values of contact pressure depend almost linearly on the existing pressing forces. According to the results of numerical studies of the stress-strain state of the elements of separation punches, the refined dependencies of their strength and stiffness characteristics on the design and technological parameters were established.

Keywords: separation stamp, stress-strain state, stamping tooling, contact interaction, finite element method.

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 штамів 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

переналаджуваного пакета, шляхом заміни якого можна перелаштовуватися 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 передбачають розробку 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 і жорсткості з урахуванням множинного контакту їхніх елементів.

У той же час існуючі аналітичні та чисельні методики розрахунку елементів штампного оснащення (ЕШО) 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 штампного оснащення за критеріями забезпечення міцності і жорсткості. Розв'язання цієї задачі для штампів, що здійснюють операції вирубк-пробивання листового матеріалу, є актуальним та складає напрямок поставлених до розв'язання у роботі досліджень.

Аналіз існуючих методів розрахунку напружено-деформованого стану та дослідження контактної взаємодії елементів штампного оснащення. Різні методи дослідження точнісних, жорсткісних, стійкісних, міцнісних характеристик елементів штампної оснастки наведені у роботах І.С. Алієва, В.В. Драгобецького, Є.І. Заярненка, О.Я. Мовшовича, О.Ф. Тарасова, В.А. Тітова, Є.А. Фролова, N. Kardes, W. Liu, L.C. Zhang та інших дослідників [1–19]. 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 досліджень. Зокрема, можна за означеним напрямком відзначити роботи про деформацію елементів блока штампів та інструмента [1], базових плит та інших елементів штампів [2–4], про дослідження точності збирання оснащення [5], про моделювання конструкцій штампів, процесів і станів при обробці матеріалів тиском [6–15]. При цьому

особлива увага приділяється чисельним методам аналізу напружено-деформованих станів (НДС) пружних тіл та систем тіл [13, 16–19]. Таким чином, проведений аналіз дав підстави визначити, що множинна контактна взаємодія є важливою, проте врахована недостатньо, що, у свою чергу, дає можливість зробити висновок про актуальність і важливість поставленої задачі та визначити завдання досліджень. Ця робота знаходиться у руслі розвитку методів та моделей, розроблених та описаних у попередніх публікаціях авторів [20–25].

Постановка задач дослідження. Для обґрунтування вибору та напрямків розвитку і застосування математичних моделей, чисельних та експериментальних методів, що використані та адаптовані у роботі для досліджень НДС розділових штампів (РШ), залучається математична модель множинної контактної взаємодії елементів РШ. Для реалізації 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 у єдиний комплекс. Усі перелічені моделі, методи та засоби мають переваги для розв'язання задач, що виникають. Так, МСЕ володіє широким арсеналом аналізу НДС деталей конструкцій, у т.ч. – із урахуванням контактної взаємодії. Метод із використанням чутливих до тиску плівок дає можливість безпосередньо вимірювати контактний тиск між деталями конструкцій. Метод параметричного моделювання дає змогу варіювати розрахункові моделі досліджуваних елементів ЕШО.

Із залученням, адаптацією та розвитком цих методів поставлені та розв'язані наступні задачі:

1) розробити вдосконалену математичну модель напружено-деформованого стану елементів РШ з урахуванням множинної контактної взаємодії, а також інтегрувати у цю модель набір варіюваних і контрольованих параметрів;

2) створити удосконалені чисельні моделі НДС контактуючих елементів досліджуваних штампів для розділових операцій на основі розробленої математичної моделі;

3) розв'язати на створеній основі прикладні задачі дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів на міцність і жорсткість ЕШО;

4) проаналізувати та узагальнити виявлені фізичні особливості у розподілі компонент НДС;

5) експериментально дослідити НДС і контактну взаємодію елементів РШ.

Математична модель напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення. У загальному вигляді задача дослідження міцності, стійкісних, жорсткісних і точнісних характеристик ЕШО виливається у 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 РШ.

У розгорненому вигляді співвідношення для визначення напружень елементів штампного оснащення;

f – масив зовнішніх навантажень;

t – час;

p – масив узагальнених параметрів: саме вони визначають варіативність геометричної форми, розмірів, властивостей матеріалу елементів штампного оснащення, саме завдяки їм вдається здійснювати різноманітні дослідження для обґрунтування раціональних параметрів елементів НДС ЕШО мають вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= 1/2 \left(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{i,r} \cdot u_{r,i} \right), \\ \sigma_{ij,j} + F_i &= 0, \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \end{aligned} \quad (2)$$

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 досліджуваних об'єктів, тензорів деформацій і напружень відповідно;

C_{ijkl} – тензор модулів пружності матеріалів, із 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 цими індексами).

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

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

Тут u – компоненти переміщень, а n – компоненти нормалей (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.

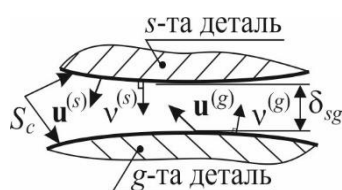


Рис. 1 – Умови контактної взаємодії елементів РШ

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 із 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

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

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, зміщення 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. Це справедливо для випадку нульового зазору δ_{sg} між контактуючими елементами.

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

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

де M, C – матриці мас і жорсткості, а \mathbf{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 :

$$\left(C - \omega^2 M \right) \lambda = 0, \quad Det \left(C - \omega^2 M \right) = 0. \quad (8)$$

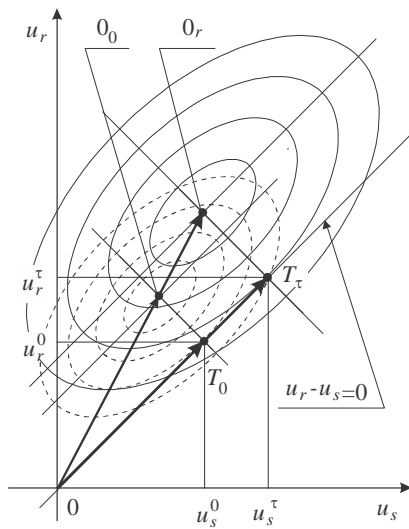


Рис. 2 – Лінії рівня функції I в перерізі координат $u_r - u_s$

Як показали результати подальших чисельних експериментів, частота збудження від кривошипно-шатунних пресів на порядки нижча власних частот коливань базових плит, блоків: $\nu = 1/T \ll \nu_1 = 1/T_1$. Таким чином, обґрунтовується квазістатична постановка задачі.

У результаті запропоновано теоретичні основи аналізу напружено-деформованого стану 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 РПШ.

Чисельна реалізація математичної моделі.

Створені математичні моделі знайшли свою реалізацію у вигляді спеціалізованого програмно-моделного комплексу (СПМК), представленого на рис. 3. Він об'єднує, 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 елементів РПШ). Це дало можливість перейти до розв'язання прикладних задач.

Прикладні задачі досліджень. У першу чергу, були досліджені власні частоти (ВЧК) і власні форми коливань (ВФК) нижніх базових плит, а також блоків РПШ у зборі.

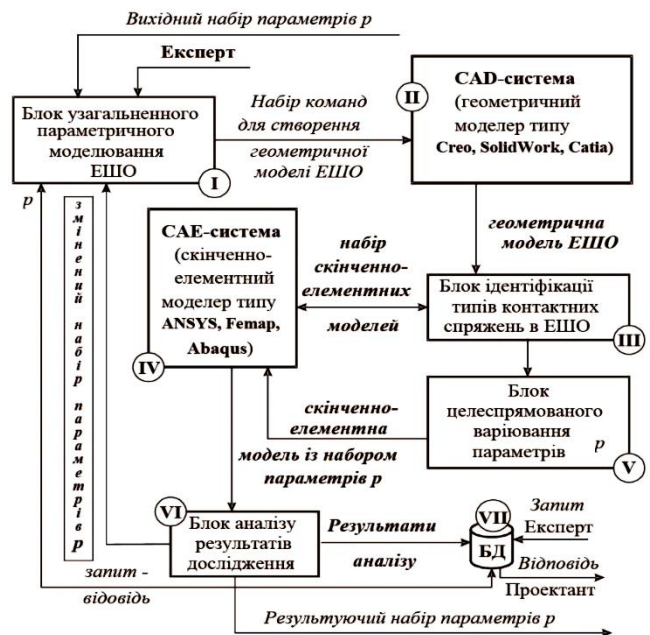


Рис. 3 – Структура СПМК для дослідження НДС ЕШО з урахуванням контактної взаємодії

Зіставлення спектрів ВЧК і ВФК (рис. 4, 5) з частотою навантаження і видом навантаження однозначно підтверджує можливість і правомірність квазістатичної постановки задачі аналізу НДС ЕШО, оскільки нижні частоти власних коливань вищі, ніж частоти збурення.

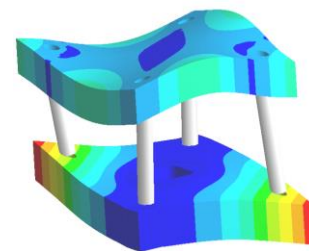


Рис. 4 – Приклад ВФК блока штампа з частотою 4,24 Гц (Shell-конструктиви)

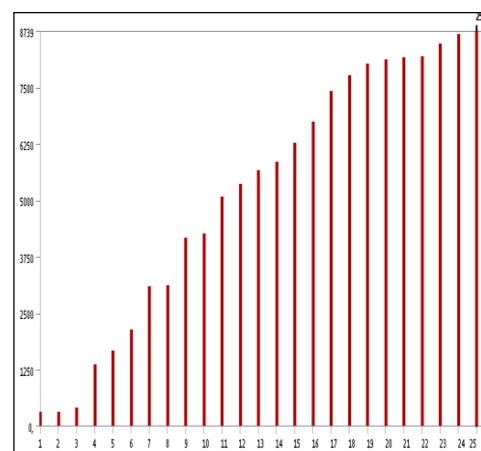


Рис. 5 – Спектр власних частот коливань (Гц) блока штампа (Shell-конструктиви)

Далі були розв'язані задачі про контактну взаємодію ЕШО у різних постановках (рис. 6). Зокрема, досліджено

вплив товщини нижньої базової плити та діаметра провального отвору у підштамповій плиті преса на контактний тиск, напруження і переміщення.

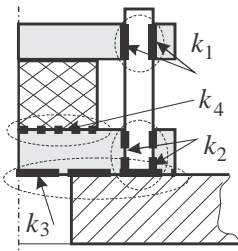


Рис. 6 – Елементи досліджуваної технологічної системи та відповідні характерні зони контактної взаємодії $k_1 \div k_4$

Встановлено такі закономірності (рис. 7, 8): напруження в елементах даної підсистеми концентруються в зонах їх механічного контакту; напруження і контактний тиск розподіляються на площях контактного 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).

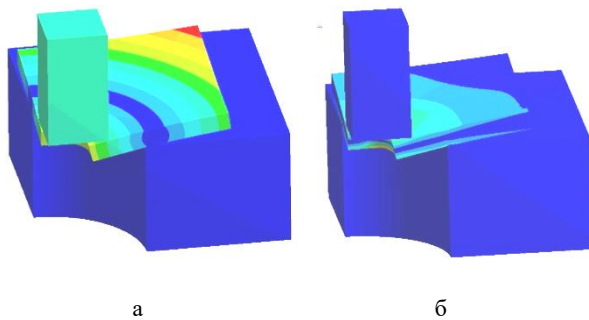


Рис. 7 – Результати дослідження НДС елементів штампів:
а – розподіл повних переміщень;
б – еквівалентні напруження за Мізесом

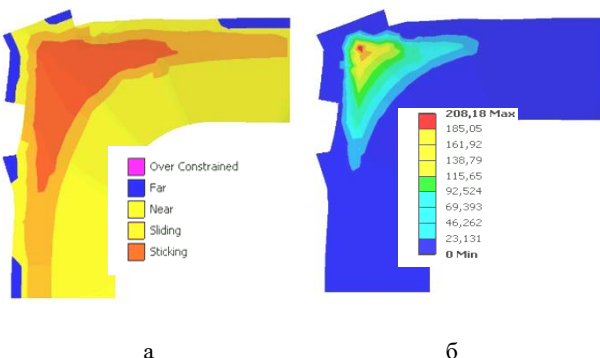


Рис. 8 – Результати дослідження НДС елементів штампів у сполученні змінного пакету та базової плити: а – контактні зони; б – контактний тиск

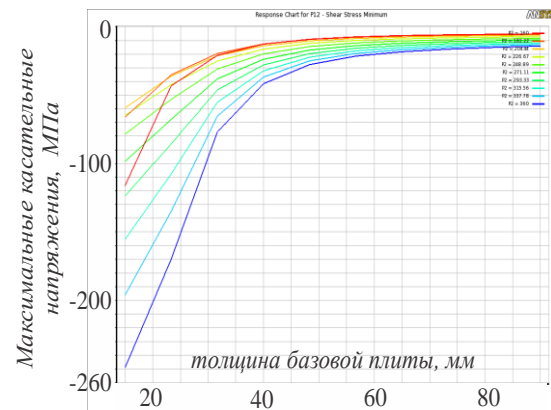
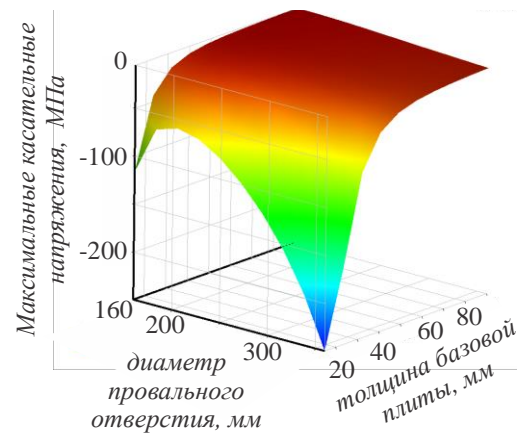


Рис. 9 – Залежність максимальних за величиною дотичних напружень від товщини базової плити та діаметра провального отвору

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 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 із 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 з 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 ураховувати 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 зусиль носять приблизно лінійний характер з відхиленням до 3%.

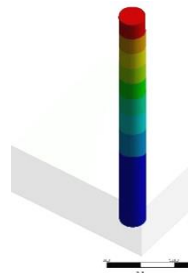


Рис. 10 – Розподіл повних переміщень у колонці штамп

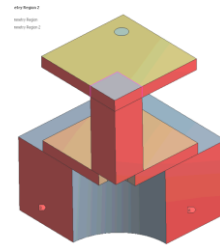
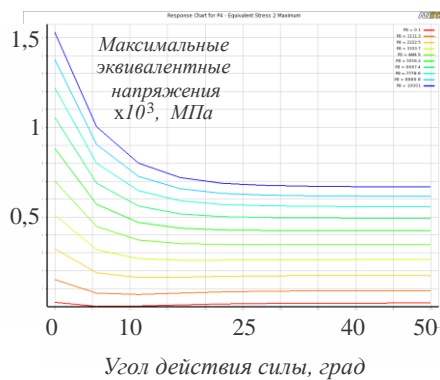
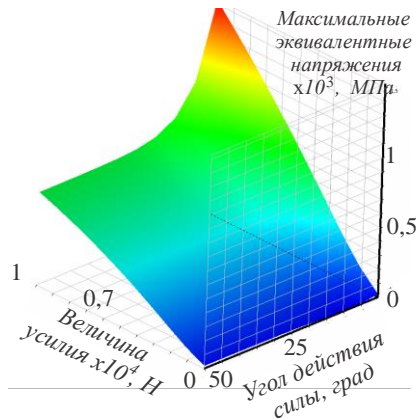
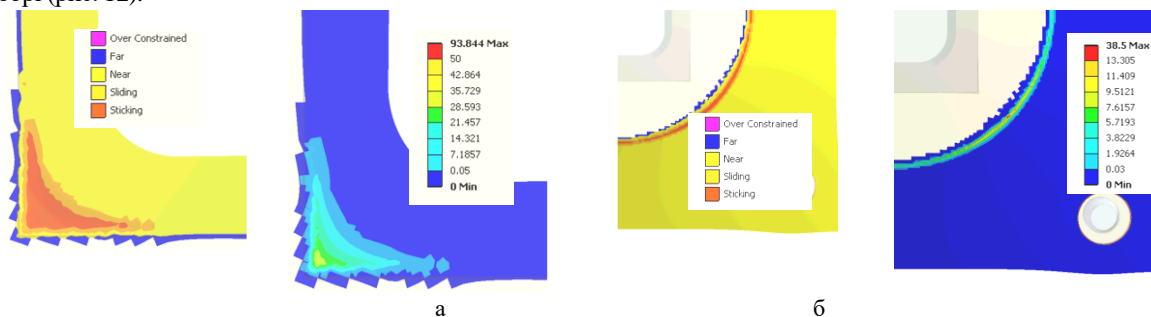


Рис. 12 – Розділовий штамп: геометрична модель

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

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

Рис. 13 – Картини розподілу контактного тиску у зонах: а – k_4 ; б – k_3 ($P_{шт} = 10$ кН) (див. рис. 6)

Як випливає з аналізу отриманих результатів, напружено-деформований стан цієї системи має ті ж особливості, що були встановлені на частинних моделях. Дійсно, виявлені закономірності (рис. 13), а саме щодо істотно нерівномірного розподілу контактного тиску у сполученнях елементів штампового оснащення, підтверджуються з відмінністю до 5%. Те ж можна сказати і про розподіл повних переміщень, еквівалентних напружень за Мізесом (рис. 14). З усієї системи можна виокремити картини напружено-деформованого стану окремих елементів (рис. 15–17). Вони також дають підстави 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 результати щодо контактного тиску. Із задовільною для практики точністю відзначена лінійна залежність контактного тиску від зусиль штампування з похибкою до 2-4%. На рис. 19 – 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. 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.

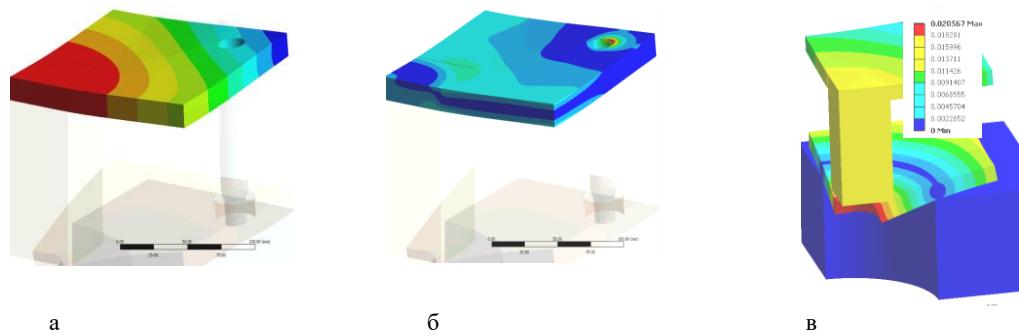
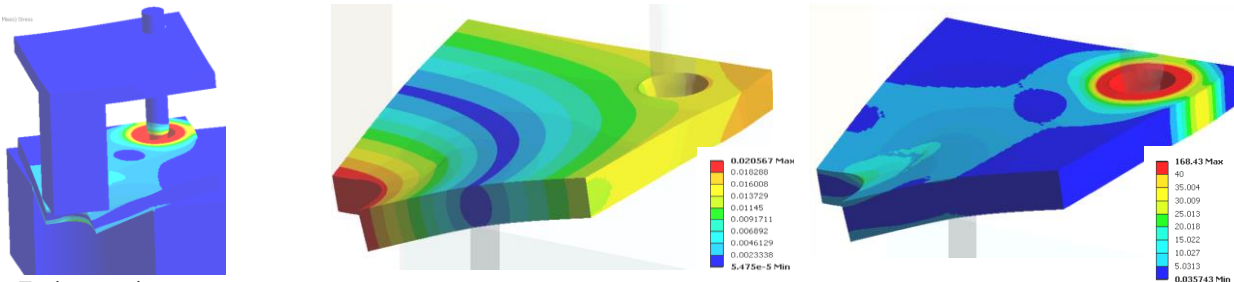


Рис. 14 – Картини розподілу компонент НДС у верхній базовій плиті ($P_{шт} = 10$ кН):
а – повні переміщення; б – еквівалентні напруження за Мізесом; в – повні переміщення



Еквівалентні напруження за Мізесом

Рис. 16 – Картини розподілу компонент НДС у нижній базовій плиті ($P_{шт} = 10$ кН):
а – повні переміщення; б – еквівалентні напруження за Мізесом

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

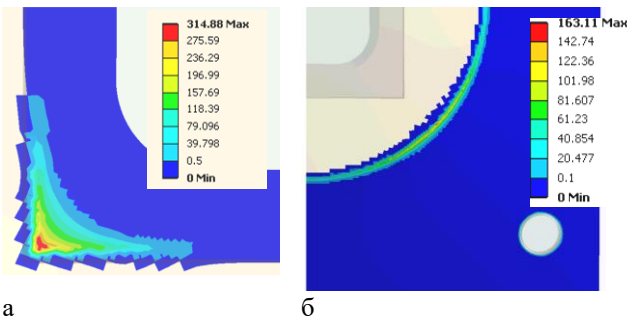


Рис. 17 – Картини розподілу контактної тиску у зонах (див. рис. 6): а – k_4 ; б – k_3 ($P_{шт} = 100$ кН)

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 напружено-деформованого стану можна проаналізувати за результатами 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.

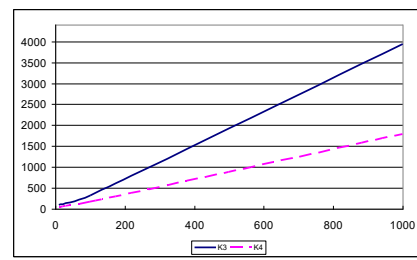
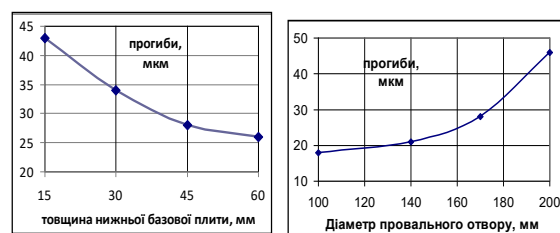


Рис. 18 – Залежність максимального контактної тиску у сполученнях від величини зусилля штампування k_4, k_3



Еквівалентні (за Мізесом) напруження

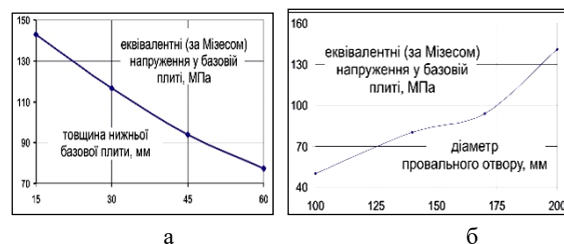


Рис. 19 – Картина НДС у базовій плиті:
а – при різних значеннях товщини нижньої базової плити h ($D = 170$ мм); б – при варіюванні діаметру провального отвору ($h = 45$ мм)

Експериментальні дослідження. Для обґрунтування точності одержуваних чисельно результатів дослідження НДС елементів технологічного 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. Зокрема, були залучені результати досліджень НДС базових плит методом голографічної інтерферометрії, тензометрії і контактних відбитків. Відповідність чисельно і експериментально отриманих, причому як у ході власних, так і у ході випробувань, проведених іншими дослідниками [2], становить 10–15% за середнім відхиленням контактного тиску, визначеного чисельно та експериментально (рис. 20, 21).



Рис. 20 – Загальний вигляд станду

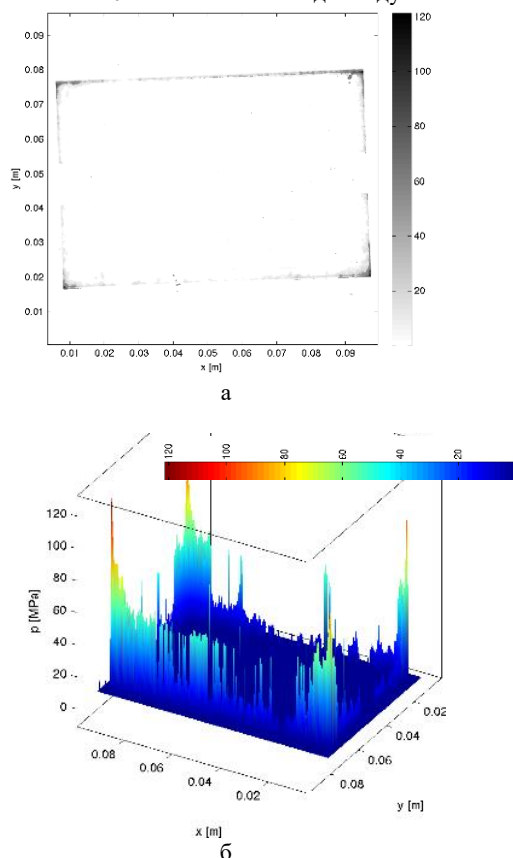


Рис. 21 – Результати дослідження взаємодії пакета із базовою плитою: площа поверхні – 358.08 мм², $P = 5938.11$ Н, $p_{\max} = 121.21$ МПа: а – відбиток; б – розподіл тиску

Висновки та рекомендації. Отримані результати служать як основа при обґрунтуванні раціональних проектно-технологічних рішень РІШ. Зокрема, мова йде про обґрунтування товщини нижніх базових плит РІШ, 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 елементах штампового оснащення $\sigma_3^{\max} \leq [\sigma]$, жорсткість – 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 технологічного оснащення для штампування деталей на підприємствах в умовах низької серійності.

Список літератури

1. Тарасов А. Ф., Короткий С. А. Влияние конструкции штампа на деформацию элементов блока и рабочего инструмента. Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тем. зб. наук. праць. Краматорськ: ДДМА, 2004. С. 103–108.
2. Зарненко Е. И. Разработка математических моделей и расчеты на прочность разделительных переналаживаемых штампов: дисс. доктора. техн. наук: спец. 01.02.06 и 05.03.05. Харьков, 1992. 280 с.
3. Бых А. И., Кузнецова Л. Г., Мовшович А. Я. Напряженно-деформированное состояние вырубных матриц специализированных переналаживаемых штампов. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2004. № 8. С. 30–33.
4. Зарненко Е. И., Ткачук А. В., Ткачук Н. А. Исследование контактного взаимодействия пуансона со штампуемым материалом. ВСТ. Серия 2. 1985. вып. 10 (176). С. 20–23.
5. Мовшович И. Я., Фролов Е. А., Бондарь О. В. и др. Исследование параметров точности сборки универсально-сборной переналаживаемой оснастки. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 5. С. 17–21.
6. Матвийчук В. А., Михалевиц В. М., Алиева Л. И. Оценка деформируемости материала заготовок, полученных отделением методами пластического сдвига. Обработка материалов давлением. 2013. № 4 (37). С. 16–22.
7. Драгобецкий В. В., Троцко О. В., Шлык С. В. Расширение возможностей моделирования процесса сложной вытяжки. Обработка материалов давлением. 2012. № 2 (31). С. 30–34.
8. Воронцов А. Л. Описание деформаций при анализе процессов обработки металлов давлением. Ч. 1. Степень деформации и накопленная деформация. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 1. С. 3–8.
9. Воронцов А. Л. Описание деформаций при анализе процессов обработки металлов давлением. Часть 2. Выявление зон с различным деформированным состоянием. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 2. С. 3–7.
10. Воронцов А. Л. Описание деформаций при анализе процессов обработки металлов давлением. Часть 3. Деформированное состояние и учет упрочнения при осадке и вдавливании в полупрозрачное. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 3.
11. Шибиков В. Г., Мулюков Р. И., Вильданов И. З. Разработка конструкторско-технологической модели детали для САПР ТП обработки металлов давлением. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 8. С. 15–20.

12. Тарасов А. Ф., Колесникова Г. В., Спасская А. М. и др. Регрессионно-математическое моделирование энергосиловых параметров процесса холодной прокатки. *Обработка материалов давлением*. 2010. № 2(23). С. 72–78.
 13. Тарасов А. Ф., Короткий С. А. Моделирование разделительных операций на основе оценки степени использования ресурса пластичности материала в среде системы конечно-элементного анализа ABAQUS. *Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні: наук. журнал*. Запоріжжя: 2010. № 1. С. 114–117.
 14. Алиева Л. И., Борисов Р. С., Савчинский И. Г. Методика расчета и проектирования процессов выдавливания в разъемных матрицах. *Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej, V miedzynarodowa konferencja naukowa: Seria Metalurgia*, nr 39. Czestohowa: Wipmifs, 2004. С. 383–391.
 15. Popat P. B., Ghosh A., Kishore N. N. Finite – element analysis of the blanking process. *Journal of Mechanical Working Technology*. Amsterdam. 1989. Vol. 18. № 3. Pp. 269–282.
 16. Михаленко Ф. П., Гулиев А. И. Закономерности распределения интенсивности напряжений и деформаций по пояску смятия при вырубке-пробивке. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1989. № 12. С. 17–19.
 17. Шибакон В. Г., Панкратов Д. Л., Виноградов А. И. и др. Система автоматизированного расчета технологических свойств металла в процессах разделительных операций листовых штамповки. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2015. № 4. С. 36–40.
 18. Oujebbour F.-Z., Habbal A., Ellaia R., Zhao Z. Multicriteria shape design of a sheet contour in stamping. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2014. Vol. 1, No. 3. P. 187–193.
 19. Hamdaoui M., Le Quilliec G., Breitkopf P., Villon P. POD surrogates for real-time multi-parametric sheet metal forming problems. *International Journal of Material Forming*. 2013. Pp. 1–22.
 20. Ищенко О. А., Демина Н. А., Грабовский А. В. и др. Моделирование напряженно-деформированного состояния базовых плит разделительных штампов. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. Москва, 2012. №9. С. 40–44.
 21. Ищенко О. А. Контактное взаимодействие элементов штампов для разделительных операций. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2013. № 1. С. 93–96.
 22. Ткачук Н. А., Ищенко Н. А., Ткачук Н. Н. и др. Расчетно-экспериментальное исследование элементов штамповой оснастки. *Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*. 2017. № 3 (24Е). С. 11–19.
 23. Ткачук Н. А., Демина Н. А., Сердюк Ю. Д. и др. Моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки. *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. Краматорск: ДГМА*, 2010. № 2 (23). С. 240–248.
 24. Ткачук Н. Н., Мовшович И. Я., Ткачук Н. А. и др. Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 3. Прямой и вариационный методы решения задачи негерцевского нормального контакта гладких тел. 4. Модель контакта шероховатых тел. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. Москва: ООО "Тисо Принт"*, 2014. № 4. С. 3–8.
 25. Ткачук Н., Скрипченко Н., Ткачук Н., Грабовский А. Численные методы контактного анализа корпусов сложной формы с учетом нелинейных промежуточных слоев. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. Том 5, № 7 (95). С. 22–31.
- References (transliterated)**
1. Tarasov A. F., Korotkij S. A. Vliyanie konstrukcii shtampa na deformatsiju jelementov bloka i rabocheho instrumenta [Influence of stamp design on deformation of block elements and working tool]. *Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni. Tem. zb. nauk. prac'. Kramatorsk: DDMA Publ.*, 2004, pp. 103–108.
 2. Zajamenko E. I. *Razrabotka matematicheskikh modelej i raschety na prochnost' razdelitel'nyh perenalazhivaemyh shtampov: diss... doktora tehn. nauk. 01.02.06 i 05.03.05*. [Development of mathematical models and strength calculations of dividing returnable diesspec. Dr. eng.sci.diss.]. Har'kov, 1992. 280 p.
 3. Byh A. I., Kuznecova L. G., Movshovich A. Ja. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie vyrubnyh matric specializirovannyh perenalazhivaemyh shtampov [Stress-strain state of cutting matrices of specialized readable stamps]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2004, No8, pp. 30–33.
 4. Zajamenko E. I., Tkachuk A. V., Tkachuk N. A. Issledovanie kontaktnogo vzaimodejstvija puansona so shtampuemym materialom [The study of the contact interaction of the punch with the stamped material]. *VOT. Serija 2*. 1985, vyp.10 (176), pp. 20–23.
 5. Movshovich I. Ja., Frolov E. A., Bondar' O. V. i dr. Issledovanie parametrov tochnosti sborki universal'no-sbornoj perenalazhivaemoj osnastki [Investigation of the accuracy parameters of the assembly of the universal modular retrofitted rig]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 5, pp. 17–21.
 6. Matvijchuk V. A., Mihalevich V. M., Alieva L. I. Ocenka deformiruемости материала zagotovok, poluchennyh otdeleniem metodami plasticheskogo sdviga [Evaluation of the deformability of the material of the workpieces obtained by separation by the methods of plastic shear]. *Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 4 (37), pp. 16–22.
 7. Dragobekij V. V., Trocko O. V., Shlyk S. V. Rasshirenie vozmozhnostej modelirovanija processa slozhnoj vytjazhki [Expansion of possibilities for modeling a complex extraction process]. *Obrabotka materialov davleniem*. 2012, No. 2 (31), pp. 30–34.
 8. Voroncov A. L. Opisanie deformacij pri analize processov obrabotki metallov davleniem. Ch. 1. Stepen' deformacii i nakoplennaja deformacija [Description of deformations in the analysis of metal forming processes. Part 1. The degree of deformation and accumulated deformation]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 1, pp. 3–8.
 9. Voroncov A. L. Opisanie deformacij pri analize processov obrabotki metallov davleniem. Chast' 2. Vyjavlenie zon s razlichnym deformirovannyim sostojaniem [Description of deformations in the analysis of metal forming processes. Part 2. Identification of zones with different deformed state]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 2, pp. 3–7.
 10. Voroncov A. L. Opisanie deformacij pri analize processov obrabotki metallov davleniem. Chast' 3. Deformirovannoe sostojanie i uchety uprochnenija pri osadke i vdavlivanii v poluprostranstvo [Description of deformations in the analysis of metal forming processes. Part 3. Deformed state and consideration of hardening during upsetting and indentation into a half-space]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 3.
 11. Shibakov V. G., Muljukov R. I., Vil'danov I. Z. Razrabotka konstruktorsko-tehnologicheskoi modeli detali dlja SAPR TP obrabotki metallov davleniem [Development of a design-technological model of a part for CAD of metal forming]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 8, pp. 15–20.
 12. Tarasov A. F., Kolesnikova G. V., Spaskaja A. M. i dr. Regressionno-matematicheskoe modelirovanie jenergosilovyh parametrov processa holodnoj prokatki [Regression-mathematical modeling of the power parameters of the cold rolling process]. *Obrabotka materialov davleniem*. 2010, No. 2(23), pp. 72–78.
 13. Tarasov A. F., Korotkij S. A. Modelirovanie razdelitel'nyh operacij na osnove ocenki stepeni ispol'zovanija resursa plastichnosti materiala v srede sistemy konechno-jelementnogo analiza ABAQUS [Simulation of separation operations based on the assessment of the degree of utilization of the material plasticity resource in the environment of the system of finite element analysis ABAQUS]. *Novi materiali ta tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni: nauk. zhurnal. Zaporizhzhja*: 2010, No. 1, pp. 114–117.
 14. Alieva L. I., Borisov R. S., Savchinskij I. G. Metodika rascheta i projektirovanija processov vydavlivanija v razjomnyh matricah [Method of calculation and design of extrusion processes in split matrices]. *Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej, V miedzynarodowa konferencja naukowa: Seria Metalurgia*, Czestohowa: Wipmifs, 2004, pp. 383–391.
 15. Popat P. B., Ghosh A., Kishore N. N. Finite–element analysis of the blanking process. *Journal of Mechanical Working Technology*. Amsterdam. 1989, vol. 18, No. 3, pp. 269–282.
 16. Mihalenko F. P., Guliev A. I. Zakonomernosti raspredelenija intensivnosti naprjazhenij i deformacij po pojasku smjatija pri vyrubke-probivke [Patterns of stress intensity and strain distribution along the belt of collapse during cutting-punching]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo*. 1989, No. 12, pp. 17–19.
 17. Shibakov V. G., Pankratov D. L., Vinogradov A. I. i dr. Sistema avtomatizirovannogo rascheta tehnologicheskikh svojstv metalla v processah razdelitel'nyh operacij listovoj shtampovki [The system of automated calculation of the technological properties of the metal in the processes of separation of sheet metal stamping]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2015, No. 4, pp. 36–40.
 18. Oujebbour F.-Z., Habbal A., Ellaia R., Zhao Z. Multicriteria shape design of a sheet contour in stamping. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2014, vol. 1, No. 3, pp. 187–193.
 19. Hamdaoui M., Le Quilliec G., Breitkopf P., Villon P. POD surrogates for real-time multi-parametric sheet metal forming problems. *International Journal of Material Forming*. 2013, pp. 1–22.

20. Ishhenko O. A., Demina N. A., Grabovskij A. V. i dr. Modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya bazovyh plit razdelitel'nyh shtampov [Simulation of the stress-strain state of the base plates separation dies]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. Moskva, 2012, No. 9, pp. 40–44.
21. Ishhenko O. A. Kontaknoe vzaimodejstvie jelementov shtampov dlja razdelitel'nyh operacij [Contact interaction of stamp elements for separation operations]. *Novi materialy` i tehnologiji v metalurgiji ta mashy`nubuduvanni*. 2013, No. 1, pp. 93–96.
22. Tkachuk N. A., Ishhenko O. A., Tkachuk N. N. i dr. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie jelementov shtampovoj osnastki [Computational and experimental study of elements of die tooling]. *Nauchnyj Vestnik Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii*. 2017, No. 3 (24E), pp. 11–19.
23. Tkachuk N. A., Demina N. A., Serdjuk Ju. D. i dr. Modelirovanie kontaktnogo vzaimodejstvija jelementov shtampovoj osnastki [Simulation of the contact interaction of elements of die tooling]. *Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. tr. Kramatorsk: DGMA*, 2010, No. 2 (23), pp. 240–248.
24. Tkachuk N. N., Movshovich I. Ja., Tkachuk N. A. i dr. Analiz kontaktnogo vzaimodejstvija gladkih i sherohovatyh tel metodom granichnyh jelementov: modeli i razreshajushhie sootnosheniya. 3. Prjamoj i variacionnyj metody reshenija zadachi negercevsckogo normal'nogo kontakta gladkih tel. 4. Model' kontakta sherohovatyh tel [Analysis of the contact interaction of smooth and rough bodies by the method of boundary elements: models and resolving relations. 3. Direct and variational methods for solving the problem of the non-Hertz normal contact of smooth bodies. 4. Model of contact of rough bodies]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. Moscow: OOO "Tiso Print"*. 2014, No. 4, pp. 3–8.
25. Tkachuk N., Skripchenko N., Tkachuk N., Grabovskij A. Chislennye metody kontaktnogo analiza korpusov slozhnoj formy s uchedom nelinejnyh interfejsnyh sloev [Numerical methods for contact analysis of buildings of complex shape, taking into account nonlinear interface layers]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. 2018. Vol 5, No. 7 (95), pp. 22–31.

Надійшла (received) 22.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola Anatoliyivich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Ищенко Ольга Анатоліївна (Ищенко Ольга Анатольевна, Ishchenko Olha Anatoliyivna) – Таврійський державний агротехнологічний університет, старший викладач кафедри вищої математики та фізики; м. Мелітополь, Запорізька обл., Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5274-2618>; E-mail: olha.ishchenko@tsatu.edu.ua.

Дьоміна Наталія Анатоліївна (Дёмина Наталья Анатольевна, Diomina Natalia Anatoliyivna) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Таврійський державний агротехнологічний університет, доцент кафедри вищої математики та фізики; м. Мелітополь, Запорізька обл., Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1118-1834>; E-mail: natalia.domina@tsatu.edu.ua.

Ткачук Микола Миколайович (Ткачук Николай Николаевич, Tkachuk Mykola Mykolayovych) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший науковий співробітник кафедри інформаційних технологій та систем колісних і гусеничних машин імені О.О. Морозова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>; e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org

Грбовський Андрій Володимирович (Грбовский Андрей Владимирович, Grabovskiy Andrey Vladimirovich) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Шеманська Вікторія Вікторівна (Шеманская Виктория Викторовна, Shemanska Viktoria Viktorivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка, м. Харків, Україна; e-mail: s1605@tmm-sapr.org.

Васильченко Дар'я Романівна (Васильченко Дарья Романовна, Vasilchenko Darja Romanivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка, м. Харків, Україна; e-mail: tma@tmm-sapr.org.