

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Іщенко Ольга Анатоліївна

УДК 621.98.073:539.3

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.А. Іщенко

Науковий керівник
Ткачук Микола Анатолійович,
доктор технічних наук, професор

Харків - 2019

АНОТАЦІЯ

Ищенко О.А. Обґрунтування проектно-технологічних параметрів розділових штампів шляхом підвищення міцнісних та жорсткісних характеристик основних елементів. – Кваліфікаційна наукова праця 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». Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2019.

Дисертація спрямована на 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 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 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.

Вперше встановлено, що при багатоконтактному сполученні набору елементів штампів, що є багат шаровою 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.

За результатами чисельних досліджень напружено-деформованого стану елементів розділових штампів установлені уточнені залежності їхніх 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 з цим доцільно обирати проектні параметри елементів штампів у зоні переходу залежностей напружень і переміщень від варійованих параметрів від практично горизонтальних ділянок до ділянок підйому.

Виявлено, що для реального діапазону варіювання проектних параметрів елементів штампового оснащення нижні власні частоти коливань набагато вищі частот дії збурювальних сил. У результаті встановлена можливість квазістатичної постановки задачі визначення напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення, що знайшло також 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 елементів штампового оснащення, а потім поширити отримані результати на множину штампованих деталей шляхом використання лінійної залежності від сил штампування.

Вперше встановлено, що при фіксації напрямних колонок і втулок у базових плитах переналагоджуваних штампів за допомогою полімерних компаундів у тонких з'єднувальних шарах 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 ниж-

че, ніж визначаються за спрощеним аналітичними виразами, або приблизно на рівні, який визначається дослідним шляхом, наприклад, при випресовці закріплених елементів із посадочних плит.

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.

Розроблена комплексна модель отримала програмну реалізацію у спеціалізованому програмно-модельному комплексі, який, на відміну від традиційних засобів комп'ютерного моделювання методом скінченних елементів, надає можливості розв'язання не лише одиничних задач аналізу, але і цілих їх серій у автоматизованому режимі. Крім того, 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, установлених на моделях нижнього рівня: у разі якісного та кількісного "успадкування" результатів розрахунку при застосуванні моделі верхнього рівня забезпечується високий ступінь достовірності та широка область застосування. В іншому випадку цикл ускладнення моделей повторюється.

Зокрема, на моделі верхнього рівня (що містить нижню і верхню базові плити, пакет, напрямні колонки і підштампову плиту преса) 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.

На основі аналізу спектру частот коливань елементів, досліджених розділових штампів у сукупності, додатково обґрунтовано можливість квазістатичної постановки задачі аналізу їх напружено-деформованого стану. Крім

того, для системи контактуючих за узгодженими поверхнями елементів розділових штампів встановлена справедливість лінійної залежності рівня контактного тиску від сил штампування та практичну незмінність площадки контакту при його варіюванні. 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.

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, фіксуючого 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, що накопичуються в спеціалізованих базах даних, є основою для прийняття проектно-технологічних рішень для розділових штампів.

Експериментальні дослідження в цілому підтверджують встановлені розрахунковим шляхом закономірності та отримані результати. Отримана повна якісна та задовільна кількісна відповідність цих розрахунків і експериментів. Похибка за розрахунками контактних тисків, 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.

На основі створених у роботі моделей та методів можлива побудова спеціалізованої бази даних, яка містить інформацію про проектні, технологічні, експлуатаційні характеристики штампів для розділових операцій листового штампування, а також визначені розрахунковим шляхом характеристики міцності, стійкості, жорсткості та точності виконання технологічних операцій. Це дає змогу в автоматизованому режимі здійснювати підбір готових штампів або обґрунтування основних проектних параметрів нових штампів відповідно до потреб реального виробництва, конкретного підприємства та вимог того чи іншого виробу.

Виробничі випробування штампів для розділових операцій дають підстави для підтвердження обґрунтованості рекомендацій щодо проектно-технологічних параметрів розділових переналагоджуваних штампів. Це слугує інтегральним підтвердженням адекватності побудованих математичних та чисельних моделей, а також точності результатів, отриманих за їх допомогою. Таким чином, результати досліджень можуть бути поширені на широкий клас подібних конструкцій.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені при виконанні бюджетних та договірних досліджень, а також у ході виконання робіт за догово-

рами про співпрацю НТУ "ХПІ" з ДП "Завод ім. В. О. Малишева" та підприємствами ПАТ "Азовмаш". На низці підприємств впроваджені розроблені програмно-модельні комплекси, а рекомендації, розроблені на основі отриманих за їх допомогою результатів, послужили основою при проектуванні штампів для розділових операцій.

Розроблені підходи, моделі і методи розрахунку можуть бути використані у практиці НДІ, КБ і машинобудівних підприємств для розв'язання широкого кола задач не тільки для розділових штампів, але й інших типів штампового оснащення.

Запропоновані у 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 при забезпеченні їх міцності і жорсткості.

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

For the first time it was established that a complex stress state with sharp stress gradients was realized under fixing a [guide pin](#) and a hollow bar in the base plates of re-adjustable dies. The fixation was made by means of polymer compounds in thin interlayers, which were formed by the action of operating loads. In this regard, the critical values of operational loads were 2.0-2.5 times lower than in the case when they were determined by simplified analytical expressions.

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.

It let to quasistatize the problem of determining the stress-strain state analysis of die tooling elements on the base of analyzing frequency spectrum of vibration elements of shearing dies. In addition, a justice for a linear dependence of the contact pressure level for system elements of the shearing dies from the stress of the stamping was established. Also it was noted that a stamping pad of the contact elements, which contact with the agreed surfaces, were practically the same in the

situation when the stamp efforts change. The established regularities enable to carried out both a single solution to the problems of stress-strain state analysis and a group solution for a whole series of materials, thicknesses and parameters of stamped parts.

The pattern of influence of a number of variable parameters on their strength, stiffness, accuracy and stability were established by solving a variety of applied tasks of contact interaction between die tooling elements. It became possible to develop recommendations for the substantiation of rational technical solutions in the design and manufacture of dies for separating cold-plate stamping operations. In particular, the hyperbolic nature of an influence of design parameters of shearing dies elements on the characteristics of the stress-strain state was establish. The stresses and displacements of the points of the dies elements, when their weight change either increase dramatically (in the case of a decrease weight) or remained virtually unchanged (in the case of increasing) compared to a rational level. Meanwhile the thickness of the lower base plate, dimensions of the replacement set or failure diameter holes in the press plate die change.

For example, when the thickness of the lower base plate of the die was reduced from 40 to 20 mm, the level of equivalent stresses increases from 250 to 800 MPa, and when increasing from 40 mm to 60 mm, they decreased to 180 MPa for the studied dies. The maximum displacements decreased with the level of 380 μm to 120 μm , while increasing by 50 mm to increase to 700 μm for one of the studied options when a diameter of the failure holes in the press plate die decreased from the nominal level of 250 MPa by 50 mm. On the other hand, the technical parameters (physical-mechanical properties of a forged material, fixing material to fill the column guides and the amount of interference fit when planting installing the guides columns) effected the level of stresses and displacements in die elements almost on linear dependence. The established dependencies, which obtained in the course of multivariate calculation studies and accumulated in specialized databases, were the base for adoption of design and technological solutions for separat-

ing dies.

The experimental studies generally confirmed the patterns established by calculation and our obtained results. The full qualitative and satisfactory quantitative correspondence of the calculations and experiments was obtained. The error in the calculations of contact pressures, stresses and displacements was at the level of 12-17%. At the same time, there was a full compliance in trends for the components of the stress-strain state with varying design and technological parameters for the investigated dies.

On the basis of the models and methods created in the work, it was possible to build a specialized database that contains information about the design, technological, operational characteristics of dies for sheet stamping dividing operations, as well as the characteristics of strength, stability, rigidity and accuracy of technological operations determined by calculation. It allowed to select ready dies in the automated mode or justify the main design parameters for new dies according real manufacture needs at a specific enterprise and requirements for this or that product. Production testing of dies for dividing operations gave grounds to confirm the validity of recommendations on design and technological parameters of the shearing re-adjustable dies. This served as an integral confirmation of the adequacy of the constructed mathematical and numerical models, as well as the accuracy of the results obtained with their help. Thus, the results of the research could be extended to a wide class of similar design.

The dissertation results were implemented during the budget and contractual research. There was on cooperation of NTU 'KhPI' with SE *Zavod im. V. A. Malysheva* (The Malyshev Plant State Enterpris) and enterprises of Azovmash Private Joint Stock Company. Some of the plants embedded software and model complexes, as well as the recommendations which were developed on the basis of the findings served as a ground for designing dies.

Developed approaches, models and calculation methods could be used in the practice of research institutes, design bureaus and engineering companies for solv-

ing a wide range of tasks including shearing dies, and other types of die tooling.

The approaches proposed in the paper, the models developed, the established laws could be used in the course of scientific research, as well as design development and manufacture of shearing dies for sheet-metal production with high performance characteristics of stability and accuracy and ensuring their strength and stiffness.

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

Список публікацій здобувача

в яких опубліковані основні наукові результати 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. – Режим доступу: <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/article/view/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. – Краматорск: 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 штампов: моделі, закономірності, критерії проектних рішень. / О. А. Іщенко, 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. Тка-

чук // 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 «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – № 47 (953). – С. 34–38.

9. Демина Н.А. Экспериментальные исследования контактного взаимодействия матриц 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

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. – Мелитополь: ТДАА, 2006. – Вип.43. – С.30–37.

14. Ищенко О.А. Контактное взаимодействие элементов штампов для разде-

лительных операций / О.А. Ищенко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.– Запоріжжя: Запорізь. 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, <https://drive.google.com/file/d/0B58M3iphitDVWjFxDJZazRhbkU/view>

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

17. Контактна взаємодія елементів штампового 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

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. 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.

2. 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. – Том 1. – С.203.

3. 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 «ХПІ», 2012.– С. 161.

4. 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 «ХПІ», 2013. – С. 202.

5. 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. Товажняньського. Ч. 1. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014.– С. 202.

6. 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.

7. 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 «ХПІ», 2016.– С. 194.

8. 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 «ХПІ», 2016. – С. 27–30.

9. 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. XXV міжн. наук.-практ. конф. MicroCAD-2018, 16–18 травня 2018 р.: у 4 ч. Ч. I. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 170.

які додатково відображають наукові результати дисертації:

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 «ХПІ». Тем. вып.: Машиностроение и САПР. – Харків: НТУ «ХПІ», 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.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЧИСЕЛЬНОГО ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ, ТОЧНОСТІ, МІЦНОСТІ ТА ЖОРСТКОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ШТАМПОВОГО ОСНАЦЕННЯ.....	11
1.1 Конструктивні особливості розділових штампів та проблемні аспекти їх забезпечення.....	11
1.2 Математичні та чисельні методи та моделі для визначення міцнісних і жорсткісних характеристик елементів штампового оснащення.....	19
1.3 Аналіз розрахункових схем та моделей елементів штампового оснащення.....	25
Висновки за розділом 1. Постановка задач досліджень.....	38
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАПРЯМКІВ ТА ЗАСОБІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	40
2.1 Обґрунтування основних напрямків досліджень для синтезу проектно-технологічних рішень при розробці елементів штампового оснащення.....	40
2.2 Вибір методів теоретичних досліджень напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення та обґрунтування напрямків їх вдосконалення.....	42
2.3 Обґрунтування вибору методів експериментального дослідження напружено-деформованого стану елементів розподілових штампів.....	45
Висновки за розділом 2.....	49
3 НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ ПРИ МНОЖИННІЙ КОНТАКТНІЙ ВЗАЄМОДІЇ.....	51
3.1 Загальна постановка задач досліджень напружено-деформованого стану елементів розділових штампів.....	51
3.2 Параметричні математичні моделі напружено-деформованого стану елементів розділових штампів.....	53
3.3 Моделювання напружено-деформованого стану з урахуванням множинної контактної взаємодії елементів розділових штампів.....	56
3.4 Чисельна реалізація розробленої математичної моделі.....	68

	3
3.5 Динамічні характеристики елементів розділових штампів.....	71
3.6 Дослідження напружено-деформованого стану елементів штампів для розділових операцій.....	82
3.7 Дослідження множинного контакту елементів розділових штампів.....	97
Висновки за розділом 3.....	113
4 РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО ЕЛЕМЕНТІВ РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ.....	117
4.1 Розрахунково-експериментальні дослідження напружено-деформованого стану базових плит штампів із урахуванням контактної взаємодії.....	117
4.2 Результати експериментальних досліджень контактної взаємодії пакета із блоком розділових штампів із використанням чутливих до тиску плівок.....	137
Висновки за розділом 4.....	143
5 ВИРОБНИЧІ ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО.....	145
5.1 Обґрунтування раціональних проектно-технологічних рішень розділових штампів.....	145
5.2 Дослідно-промислові впровадження елементів розділових штампів.....	149
5.3 Впровадження результатів дисертаційних досліджень у виробництво.....	150
Висновки за розділом 5.....	151
ВИСНОВКИ.....	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	158
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача.....	181
ДОДАТОК Б Апробація результатів дисертаційної роботи на міжнародних конференціях.....	187
ДОДАТОК В Ілюстративний матеріал стосовно розподілів компонент напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення.....	189
ДОДАТОК Г Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	232

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- КВМ – коефіцієнт використання матеріалу
- СЕМ – скінченно-елементна модель
- МСЕ – метод скінченних елементів
- НДС – напружено-деформований стан
- РПШ – розділовий переналагоджувальний штамп
 - РШ – розділовий штамп
- РЕШ – ріжучий елемент штамп
- РЕМ – розрахунково-експериментальний метод
- САПР – система автоматизованого проектування
 - ВЧК – власна частота коливань
- СПШ – спеціалізований переналагоджувальний штамп
- СПМК – спеціалізований програмно-модельний комплекс
 - ТПВ – технологічна підготовка виробництва
- УЗПШ – універсально-збірний переналагоджувальний штамп
- УПШ-М – універсальний переналагоджувальний штамп із механізованим кріпленням пакетів
- ЕТС-ЛС – елемент технологічної системи листового штампування
 - ЕТС – елемент технологічної системи
- ЕШО – елемент штампового оснащення
- САД – геометричне моделювання
- САЕ – скінченно-елементне моделювання

ВСТУП

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 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 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 жорст-

кості, 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 військової 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 варійованих 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 твердотілого 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 вза-

ємодії, 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 падіння – 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 штампового оснащення.

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

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 2,0-2,5 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 штампового 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 штампового 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 штампового 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 штампування.

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 штампування. Досягнуто економічний ефект за рахунок скорочення термінів розробки, зниження металоємності штампового оснащення та подовження терміну його експлуатації. Також здійснено впровадження в навчальний процес НТУ «ХП» при підготовці фахівців з напрямку «Прикладна механіка».

Особистий внесок здобувача у роботах, виконаних у співавторстві. Всі положення дисертації, винесені на захист, розроблені здобувачем самостійно [1–29]. Зокрема, здійснені наступні дослідження: аналіз і узагальнення комплексу даних експериментальних досліджень контактних навантажень, напружень та дефор-

мацій 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 доповідались 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 «Машини 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.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЧИСЕЛЬНОГО ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ, ТОЧНОСТІ, МІЦНОСТІ ТА ЖОРСТКОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ШТАМПОВОГО ОСНАЩЕННЯ

1.1 Конструктивні особливості розділових штампів та проблемні аспекти їх забезпечення

Штампове оснащення, в залежності від виду операцій, що виконуються, охоплює гаряче і холодне, об'ємне і листове штампування, витягування, згинання і вирубки–пробивання. При цьому штампи служать для базування заготовки, для здійснення формоутворювальних операцій і подальшого видалення або транспортування готових деталей або заготовок.

Однак, незважаючи на різноманіття виконуваних операцій, різноманітність конструктивних рішень і відмінність у рівнях габаритів, товщин та силових впливів, всі види штампового оснащення вбудовані в технологічну систему "прес – штамп – формотвірні (різальні) елементи – заготовка", є її центральною частиною та сприймають силові потоки, з одного боку, – від преса, а з іншого, – з боку заготовки через формотвірні (різальні) елементи. З цієї точки зору загальний аналіз силових потоків, кінематичних зв'язків, стійкісних і точнісних параметрів можна здійснювати на прикладі будь-яких штампів. У цьому випадку як базові були обрані розділові переналагоджувані штампи (РПШ) для холоднолистового штампування.

Розглянемо конструкцію розділових штампів на прикладі переналагоджуваних штампів для вирубки-пробивання з точки зору формування в подальшому на цій основі їхніх розрахункових схем для аналізу напружено-деформованого стану як визначального чинника стійкості, міцності та точності роботи проєктованих штампів.

Певне уявлення про конструктивні особливості та розрахунок розділових штампів дає численна довідкова література, статті та дисертації [30–41]. Як зазначається в [30, 31], 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. Такий штамп призначений для штампування деталей із листових матеріалів на підприємствах із багатомономенклатурним дрібносерійним і серійним характером виробництва. Закріплення інструменту в пакетах УСПШ проводиться шляхом заливання 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 держакками і замінювати їх новими, забезпечуючи багаторазове переналагоджування і використання пакета.

В табл. 1.1 наведені основні показники технічної характеристики УСПШ [30, 31]. На рис. 1.1 схематично наведена конструкція універсально-збірного переналагоджуваного штампа для суміщеної вирубки. В універсальному блоці, що складається з верхньої 1 і нижньої 2 базових плит, які з'єднані напрямними колонками і втулками, і містить прихоплювачі 3 та хвостовик 4, розміщується пакет 5, в якому за допомогою пластмаси АСТ-Т, армованої об'ємними металевими каркасами, закріплені пуансон 6 і матриця 7 [30, 31].

У цих роботах також зазначено, що спеціалізовані переналагоджувані штампи так само, як і УЗПШ, збираються із універсальних блоків і змінних пакетів. Але пакети виготовляються на базі комплекту заготовок, який містить уніфіковані заготовки матриці, знімача, держаків, гумового буфера, підкладок, які фіксують деталі. СПШ призначені для виконання розділових операцій листового штампування деталей в умовах серійного, крупносерійного і навіть масового виробництва. Розроблено п'ять типорозмірів СПШ, кожен з яких містить блоки із

заднім, діагональним і осьовим розташуванням напрямних вузлів, а також комплекти заготовок для штампів поєднаної дії, з верхнім притиском і жорстким знімачем. В СПШ передбачена штампування деталей з листових матеріалів товщиною 4-6 мм з різними фізико-механічними характеристиками.

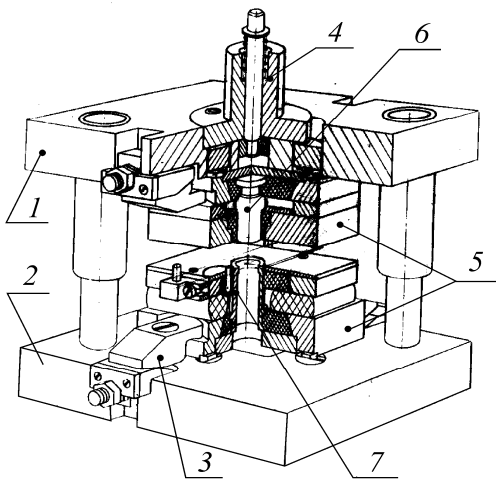
Спеціалізований штамп з прихоплювачами представлений на рис. 1.2. Його блок є, як зазначено в [30, 31], універсальним і при складанні штампа не вимагає доопрацювання; пакет у штампі є змінним; закріплення пакета у блоці здійснюється гвинтами, а фіксація – на фіксатори блоку за допомогою фіксуючих втулок пакета. Точнісні і експлуатаційні можливості СПШ відповідають аналогічним характеристикам стаціонарних штампів. Основні відомості з технічної характеристики СПШ наведено в табл. 1.2. Там же [30, 31] зазначається, що універсальні переналагоджувані штампи з механізованим закріпленням пакетів призначені для розділових операцій листового штампування деталей в умовах одиничного, дослідного, дрібносерійного і серійного виробництва і складаються з універсальних механізованих блоків і змінних переналагоджуваних пакетів (рис. 1.3).

Характерними особливостями конструкцій механізованих переналагоджуваних штампів є заднє розташування напрямних вузлів; наявність у базових плитах різних горизонтальних і вертикальних пазів, вирізів, порожнин і отворів для монтажу елементів системи механізації; механізоване закріплення пакетів з використанням пневмо-гідравлічного приводу; необхідність забезпечення точного базування і надійної фіксації змінних переналагоджуваних пакетів; закріплення різальних частин в пакетах за допомогою композиційних матеріалів типу пластмаси АСТ-Т. Основні показники технічної характеристики УПШ-М наведено у табл. 1.3.

При цьому можна виділити різні рівні підсистем технологічної системи "прес – штамп – ріжучі елементи – заготовка", які наче "вкладені один в одного". У той же час запропонована ідея не знайшла в цій роботі завершення: основний обсяг досліджень був замкнений на 3-му нижньому рівні підсистеми (див. рис. 1.4). У роботі [30] для формування розрахункових схем елементів розділових штампів (РШ) запропоновано виходити з аналізу силових потоків у всій техноло

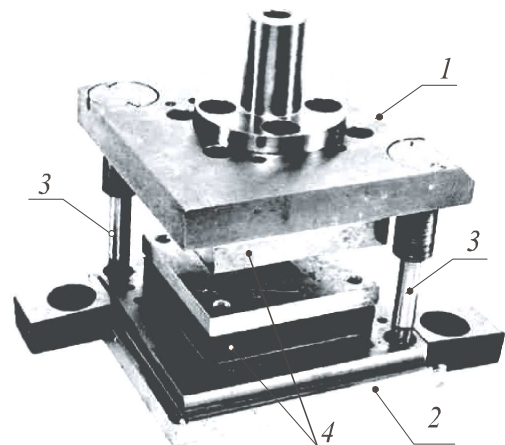
Таблиця 1.1 – Технічна характеристика УСПШ

Найменування показників	Кількісні показники
Габаритні розміри блоків, мм	150x220 – 430x450
Габаритні розміри пакетів, мм	85x115 – 320x320
Закрита висота блоків, мм	180 – 280
Закрита висота пакетів, мм	95 – 170
Розміри штампованих деталей, мм	25x40 – 200x200
Товщина матеріала, мм	0,1 – 6,0
Сили штампування, кН	250 – 1000



1 – верхня плита; 2 – нижня плита;
3 – прихоплювачі; 4 – хвостовик;
5 – пакет; 6 – пуансон; 7 – матриця

Рисунок 1.1 – Конструкція УСПШ по-однаної дії

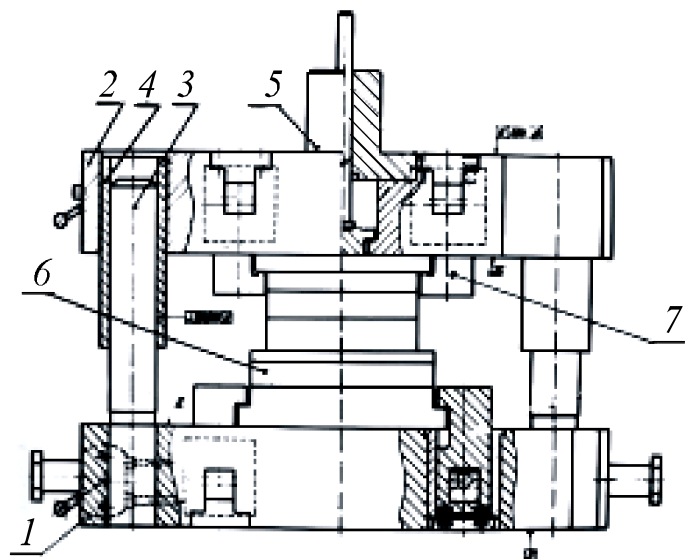


1 – верхня плита; 2 – нижня плита;
3 – напрямні колонки;
4 – змінний пакет

Рисунок 1.2 – Спеціалізований штамп з прихоплювачами

1 – нижня плита;
2 – верхня плита; 3 – втулки;
4 – напрямні колонки;
5 – хвостовик; 6 – змінний пакет;
7 – механізовані прихоплювачі

Рисунок 1.3 – Конструкція переналаджуваного штампа з механізованими прихоплювачами



Таблиця 1.2 – Технічна характеристика СПШ

Найменування показників	Типорозміри				
	1	2	3	4	5
Габаритні розміри блоку з заднім розташуванням напрямних вузлів, мм	140x160	180x220	250x320	–	–
Габаритні розміри блоку з діагональним розташуванням напрямних вузлів, мм	160x160	220x220	280x320	360x300	430x560
Габаритні розміри блоку з осьовим розташуванням напрямних вузлів, мм	140x160	180x220	250x320	–	–
Закрита висота блоку, мм	110	150	195	230	275
Сили преса, кН	25–100	100–250	400–630	630–1000	1000–2500
Габаритні розміри пакета, мм	100x100	125x125	180x180	320x320	360x360
Товщина матеріала, що штампується, мм	4,0	5,0	5,0	6,0	6,0

Таблиця 1.3 – Технічна характеристика УПШ-М

Найменування показників	Типорозміри				
	1	2	3	4	5
Габаритні розміри блоку, мм	280x504	280x504	280x504	330x580	420x665
Габаритні розміри пакета, мм	80x160	100x160	125x160	160x200	250x265
Сили преса, кН	250–400	250–400	250–400	630–1000	630–1000
Габарити деталей, що штамнуються, мм	22x36	36x48	45x67	65x95	100x150
Товщина матеріала, що штампується, мм	0,5–2,0	0,5–2,0	0,5–2,0	0,5–4,0	0,5–4,0
Закрита висота блоку, мм	175	200	210	280	295

гічній системі листового штампування. Можна погодитися з тим, що пуансони, матриці і пуансон-матриці піддаються безпосередньому впливу сил штампування, які сконцентровані у зоні ріжучих кромek (як показують дослідження [42–59]). Така концентрація призводить до локалізації напружень у зоні ріжучих кромek. Однак слід взяти до уваги, що інструментальні сталі мають більш високі механічні характеристики, а, відповідно, витримують підвищені напруження, присутні у зонах ріжучих кромek. Але в силу їх високої вартості інші елементи штампів, в першу чергу – базові плити, виготовляють зі звичайних конструкційних сталей з помірними механічними характеристиками [60–65]. Разом з тим базові плити та інші деталі є елементами, що забезпечують працездатність не тільки одного пакета, а всього блоку в цілому, і притому – з різними змінними пакетами, причому на значно триваліший період експлуатації. Таким чином, маємо проблемну ситуацію: необхідно забезпечити міцність і жорсткість елементів штампів, вбудованих у багатошарову конструкцію взаємодіючих шляхом контакту деталей, однак основними невідомими є закони їх навантаження. У свою чергу, напружено-деформований стан досліджуваних елементів штампів впливає на розподіл контактного тиску між різними елементами штампів. Таким чином, отримуємо зв'язану задачу аналізу множинної контактної взаємодії та НДС системи тіл, що утворюють власне конструкцію штампа, яка у зазначених роботах не знайшла адекватних постановок та повного розв'язання.

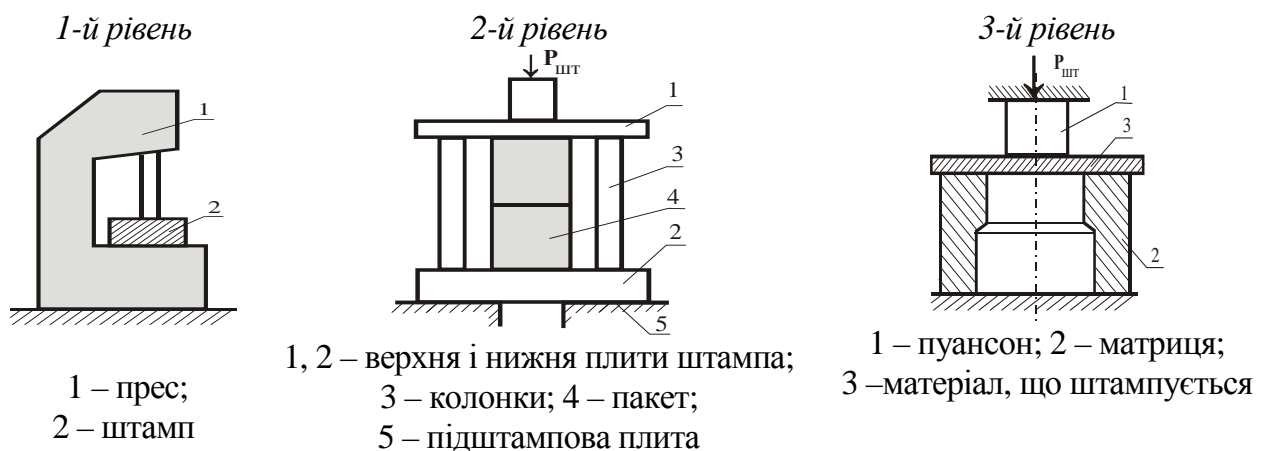


Рисунок 1.4 – Структура технологічної системи тонколистового штампування та окремі її підсистеми

У сучасному машинобудуванні існує велика номенклатура деталей, що ви-

готовляються методами холодного листового штампування], як за фізико-механічними характеристиками використовуваних матеріалів, так і за точнісними параметрами; габаритами; внутрішніми геометричними розмірами та формою; технологічними ознаками тощо.

Кількість типів, видів, класів, підкласів вирубаних або відрізаних від заготовки деталей залишається досить численною, незважаючи на те, що розділові операції листового штампування однозначно відсікають від цієї множини лише деяку частину різновидів деталей із листових матеріалів. Але всі ці деталі є плоскими (у практичному поданні), оскільки за допомогою ріжучого інструменту виготовлені з плоских заготовок. Найбільш характерні типопредставники номенклатури плоских деталей, штампованих на РПШ, показані на рис. 1.5. За геометричними параметрами за товщиною їх можна розділити на три класи: тонколистові – до 1,0 мм; середньої товщини – від 1,0 до 6,0 мм; товстолистові – завтовшки понад 6,0 мм.

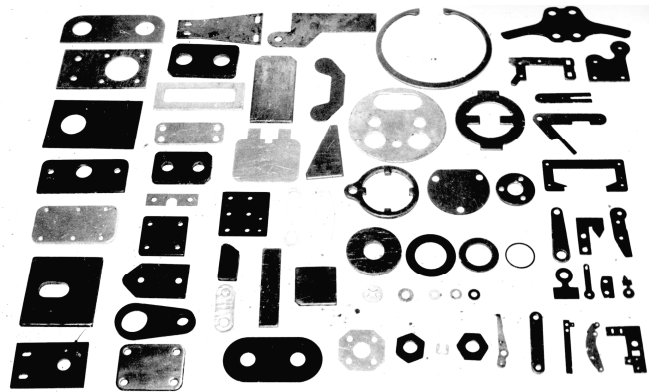


Рисунок 1.5 – Номенклатура деталей з листових матеріалів, що штампуються на РПШ

Для виготовлення деталей застосовуються у холодному листовому штампуванні різноманітні як металеві, так і неметалеві матеріали.

За величинами межі міцності і опору зрізу, можливо виділити їх у три основні групи: низькоміцні матеріали з діапазоном опору зрізу $\tau_{зр}$ від 7÷10 до 150÷200 МПа; середньоміцні матеріали з діапазоном опору зрізу $\tau_{зр}$ від 200÷220 МПа до 700÷750 МПа (дуралюміній, вуглецеві та низьколеговані сталі тощо); високоміцні матеріали з опором зрізу $\tau_{зр}$ понад 800 МПа (вуглецеві і високолеговані сталі тощо).

При вирубванні деталей з низькоміцних матеріалів сили вирубкиспробивання мають невисокий рівень, однак при цьому потрібна підвищена точність геометричних розмірів деталей, що сполучаються, та їх достатня жорсткість. При обробці високоміцних матеріалів основними є вимоги міцності.

Як зазначається в [30], розглянуті конструктивні типи ПШ мають як деякі спільні показники технічних характеристик зі стаціонарними, поелементними, універсально-збірними штампами, так і суттєві відмінності з ними, особливо за базовими плитами і видами закріплення пакетів. Переналагоджувані штампи відрізняються також і між собою як за умовами експлуатації, конструкторським виконанням, так і за схемами силової взаємодії тощо. Тому поряд із природною схожістю принципу класифікації елементів УЗПШ для розділових операцій, стаціонарних та інших штампів, у РПШ ця операція має свої особливості. Сутність функціонального призначення елемента є одним з найбільш універсальних і практично застосовуваних ознак класифікації елементів складних механічних систем технологічного оснащення. Критерієм наявності тієї чи іншої ознаки може служити роль і технологічне призначення елемента у процесі функціонування системи: робочі ріжучі елементи; опорно-базові елементи; напрямні елементи; корпусні та тримальні елементи; притискні, елементи для фіксації та видалення; кріпильні та інші монтажні елементи. Виготовляють ріжучі елементияк уже зазначалося, зазвичай зі сталей ХІ2М, У8А, У10А, для виготовлення базових плит використовують сталі 40Х, 20Х, рідше – Сталь 45.

Слід зазначити, що досить важливу роль відіграє система спрямування як у забезпеченні працездатності та довговічності конструкції, так і у досягненні високої якості та необхідної точності штампованих деталей. Не тільки чистота обробки робочих поверхонь напрямних колонок і втулок та їх взаємна підгонка як плунжерної пари має при цьому велике значення, але і їхнє взаємне розташування та закріплення у нижній та верхній базових плитах відповідно. У РПШ ця проблем вирішена за допомогою технологічного прийому узгодження "верху" і "низу" за допомогою вклейки епоксидним компаундом напрямних пар у зібраному вигляді. Потрібну кількість колонок, діаметри і деякі технологічні рішення

необхідно з'ясувати у процесі дослідження напружено-деформованого стану системи спрямування.

Зібрані у сконцентрованому вигляді класифікація, аналіз умов експлуатації і навантаження, матеріали роботи [30] дають основу для подальших досліджень міцності та стійкості, жорсткості та точності елементів штампового оснащення. Крім того, значний пласт інформації про конструктивні особливості ЕШО, аналіз діючих сил і вимоги до матеріалів і технологій міститься у багатьох роботах [66–83].

Класифікація елементів РПШ за функціональними ознаками надає можливість визначати конструктивні особливості всередині кожної групи, сформулювати раціональні технічні вимоги за міцністю та жорсткістю, що впливають з умов експлуатації штампів та вимог щодо якості та точності штампованих деталей.

Грунтуючись на аналізі представленого масиву інформації, можна відзначити, що в результаті аналізу елементів штампового оснащення як складної механічної системи отримуємо множину взаємодіючих при штампуванні тіл, що піддаються дії сили штампування, і контактують між собою. У підсумку необхідно провести побудову таких математичних моделей, які б природним чином поєднували ці два взаємопов'язаних чинники: визначення закону розподілу контактного тиску між спряженими елементами штампів, з одного боку, та їх напружено-деформованого стану, – з іншого. Це змушує здійснити аналіз методів та моделей математичного і чисельного розв'язання одержуваної складної комплексної задачі.

1.2 Математичні та чисельні методи та моделі для визначення міцнісних і жорсткісних характеристик елементів штампового оснащення

Велика кількість публікацій присвячена дослідженню процесів і станів елементів технологічних систем штампування [37–40, 66–80, 84–89]. Так, у [37] представлені результати дослідження напружено-деформованого стану в зоні притискного кільця при витяжці днищ у матриці з витяжним ребром. Використаний пакет скінченно-елементного аналізу DeForm-2D. Встановлено розподіл максимальних напружень та інтенсивності напружень у заготовці при витяжці з

притиском.

У межах тензорного підходу в теорії підсумовування пошкоджень у [66] отримано загальні співвідношення для визначення граничних деформацій металів при складному двохетапному деформуванні. Досліджено модель двохетапного деформування за схемою "зсув – стиснення".

У [67] описується теоретичний аналіз процесу вирубки прямокутної пластини товщиною 3 мм з використанням програмного середовища Deform-3D. Відзначається залежність між видом НДС в осередку деформації і товщиною матеріалу, конфігурацією і відносними розмірами деталі, які впливають на її пружний вигин, що призводить до нерівномірності деформації уздовж контуру вирубки та викликає ефект поступового зрізу.

У статті [68] специфічний характер вирубки тонколистового матеріалу досліджується моделюванням цього процесу з використанням програмного середовища Deform-3D. Проведені розрахунки деформацій та стріл прогинів заготовки в отвір матриці співрозмірні з товщиною матеріалу, і тоді поведінка заготовки матеріалу уподібнюється поведінці гнучкої пластини з теорії гнучких пластинок і оболонки. Перерозподіл напружень призводить до того, що процес вирубкиспробивання відбувається не суцільно на контурі, а поступово, починаючись з кутів контуру, поширюється до середини ріжучої кромки, при цьому збільшується якість поверхні зрізу.

Експериментальному дослідженню НДС блоків універсально-збірних штампів та визначення можливості урахуванням їхніх конструктивних особливостей у виробничих умовах присвячена робота [38]. Отримано уточнені залежності розподілу переміщень і напружень в основних елементах конструкції штампів та визначені місця максимальних напружень, що дало можливість розрахунку реальних значень міцнісних характеристик, необхідних при проектуванні переналаджуваного штампового оснащення для розділових і формоутворювальних операцій листового штампування.

У статті [39] проаналізовано деякі процеси обробки металів тиском з накладенням додаткових впливів на ділянку деформації з метою пом'якшення схе-

ми напруженого стану і найбільш повного використання пластичності матеріалу. Наведено різноманітні схеми та приклади операцій зі зміненими параметрами зовнішнього навантаження для забезпечення точності виробів, зменшення числа штампувальних переходів, підвищення коефіцієнта використання металу, полегшення конструкцій за рахунок усунення локалізації деформацій у небезпечних перерізах заготовки.

У [40] зазначено, що довговічність штампового інструменту і якість отриманих деталей при розділових операціях визначається стійкістю штампів, яка в першу чергу залежить від зносостійкості різальних частин, що знаходяться в безпосередньому контакті з оброблюваним матеріалом. Наведено аналіз умов роботи розділових штампів і конструктивних особливостей матриці та пуансона, що впливають на стійкість інструменту. Представлена скінченно-елементна модель, що дає можливість оцінити вплив параметрів інструменту на характер процесу поділу і оптимізувати процес за критеріями стійкості інструменту та витрати енергії. Аналіз результатів моделювання показав, що форма пуансона істотно впливає на напружений стан металу в зоні контакту металу з пуансоном і на енергосилові параметри процесу.

Результати досліджень параметрів точності складання універсально-збірного переналагоджуваного оснащення з використанням композиційних матеріалів викладено в [84]. Встановлені величини допусків складових ланок розмірних ланцюгів УЗПШ. Створення геометричного аналізатора як сполучного елемента для системи інтегрованого виробництва продуктів методом обробки металів тиском, який буде готувати необхідні дані, які формуються у САД системі для САПР ТП, пропонується в [79]. У [85] описана розробка нової програми для розрахунків і моделювання процесів обробки металів тиском і розглянуті основні можливості та особливості підходів до моделювання, які реалізовані в новій програмі. У статті [86] дано опис розроблених технологічних схем гібридних і комбінованих технологій листового штампування, поєднують статичне та динамічне навантаження, наведено результати їх випробування, переваги таких процесів, визначено напрямки подальшого розвитку і використання гібридних і комбіно-

ваних технологій. У роботах [87-97] описані різноманітні процеси та технологічні операції при обробці матеріалів тиском.

Усі розглянені та описані роботи містять аналіз взаємодії окремих елементів технологічних систем при обробці матеріалів тиском. Разом із тим цей аналіз здійснено на рівні, недостатньому з точки зору потреб практики.

Також у багатьох роботах досліджується значний пласт проблем моделювання при обробці металів тиском. Дослідження НДС ЕШО, інструменту та обладнання присвячені роботи [50, 53, 55, 98–106]. Різні питання теорії, конструкцій, методів розрахунку елементів технологічних систем і проблем, пов'язаних з проектуванням, дослідженням, експлуатацією та впровадженням переналагоджуваної оснастки, а також питання міцності та жорсткості окремих елементів штампів викладені у роботах [41, 63, 81, 107–122]. У той же час моделювання НДС контактуючих тіл за цими методиками застосовуються недостатньо ефективно.

Напружено-деформований стан ЕШО зводиться, як видно із аналізу робіт [50–122], до розв'язання зв'язаної задачі, причому зв'язаність низки елементів реалізується шляхом механічного контакту системи взаємодіючих тіл на поверхнях спряження. Проте у цих роботах повна постановка та розв'язання задач відсутні. Для розв'язання виникаючих задач подібного типу існує цілий ряд методів і моделей. Зокрема, значне місце серед них займає метод граничних інтегральних рівнянь (МГІР) [105, 123–132]. Основною перевагою цього методу є зниження фізичної розмірності створюваної моделі на одиницю (зокрема, замість тривимірної моделі приходимо до моделі на двовимірній області – на границях взаємодіючих тіл). Водночас цьому методу властиві й недоліки: складність застосування для тіл неканонічної форми, а також для тіл, складених з різних матеріалів; крім того, він не може безпосередньо бути поширеним на задачі, що описують різні типи нелінійностей. На додаток, ще однією важливою перешкодою на шляху широкого застосування даного методу є відсутність популярних комп'ютерних програм, що реалізують МГІР і становлять відчутну конкуренцію, наприклад, скінченно-елементним пакетам. Тим не менш, МГІР у варіанті методу граничних елементів має значні перспективи розвитку.

Одним із частинних варіантів розв'язка задачі за методом граничних інтегральних рівнянь, причому аналітичним, є розв'язок для контакту двох напівнескінчених тіл, зазор між якими описується многочленом другого ступеня від двох координат у загальній дотичній до цих тіл площині. Такого типу задачі описуються моделлю Герца [130]. Природно, що очевидною перевагою цього методу є висока оперативність. Однак цей метод і модель не застосовуються, якщо розміри зони контакту стають сумірними із розмірами контактуючих тіл; також принципово незастосовними вони є для випадку контакту тіл т. з. узгодженої форми (за класифікацією [130]). Дійсно, контактуючі елементи розділових штампів якраз сполучаються за узгодженими поверхнями, а розміри контактних площадок сумірні з розмірами взаємодіючих тіл. Таким чином, застосування моделі Герца у цьому випадку неможливе.

Одним із варіантів розв'язання контактних задач із одночасним визначенням НДС є метод варіаційних нерівностей [133–135]. Із його застосуванням, як один із варіантів, ця задача зводиться до мінімізації функціоналу повної внутрішньої енергії досліджуваної системи на множині функцій, що задовольняють умовам непроникнення тіл одне в одного, які мають вигляд нерівностей. У результаті для системи контактуючих пружних тіл отримуємо задачу квадратичного програмування – мінімізації квадратичного функціоналу на опуклій множині, що визначається системою лінійних нерівностей. Визначивши точку мінімуму функціоналу, отримуємо і розподіл контактного тиску, і напружено-деформований стан взаємодіючих тіл. Зокрема, при використанні дискретизації за методом скінченних елементів, ця задача зводиться до мінімізації квадратичної форми при лінійних обмеженнях на вузлові переміщення.

З використанням МСЕ для розв'язування контактних задач застосовні й інші постановки: метод множників Лагранжа, метод штрафу, методи з введенням шару контактних елементів, що передають тільки стискаючі сили [136–145]. МСЕ [141] реалізований у багатьох пакетах для аналізу НДС. Ці пакети (ANSYS, Abaqus, Femap) мають прями інтерфейси з системами геометричного моделювання (Creo, SolidWorks, Catia тощо). Таким чином, і при автономному використан-

ні, і в сполученні з CAD-системами можна створювати параметризовані геометричні та скінченно-елементні моделі різних елементів машинобудівних конструкцій, у т.ч. – штампів. У свою чергу, це дає можливість варіювати досліджуваній об'єкт, організовуючи процес цілеспрямованої зміни його основних параметрів з метою задоволення тих чи інших критеріїв та обмежень. У той же час пряме використання такої технології має обмежене застосування при необхідності поповнення або зменшення множини основних проектно-технологічних параметрів. У цьому випадку для вирішення цієї проблеми доцільне застосування метод узагальненого параметричного моделювання [146, 147], який дає можливість оперувати з різними чинниками, параметрами, розподілами. Зокрема, у роботі [146] представлений новий узагальнений метод параметричного опису складних механічних систем. Завдяки розробленій технології створюються передумови автоматизації найбільш трудомісткого, складного і важливого етапу проектування, – скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану. Крім того, запропонована структура спеціалізованих інтегрованих систем автоматизованого проектування. Ці системи уможливають автоматизувати весь процес проектування нових машинобудівних конструкцій та їх модернізацію. Наведено приклади застосування запропонованих технологій досліджень НДС. Технологія створення спеціалізованих інтегрованих систем автоматизованого проектування складних механічних систем описана в роботі [147]. В основу розробки покладено узагальнений параметричний підхід до опису складних механічних систем, можливості якого ілюструються на прикладі транспортних засобів спеціального призначення. Поєднуючи цей метод і МСЕ, адаптуючи їх до дослідження НДС ЕШО, можна розв'язувати задачі синтезу проектно-технологічних рішень, що забезпечують задоволення висунутих вимог до тих чи інших конструкцій, у т.ч. – штампів, за рахунок цілеспрямованої зміни варіюваних параметрів та аналізу результатів багатоваріантних розв'язків задач визначення їхнього НДС з урахуванням контактної взаємодії. При цьому необхідно розробити спеціалізовану модель досліджуваного об'єкта, адаптовану до його варіювання. Цей додатковий етап надає якісно нові можливості у процесі проектних досліджень.

Позитивний досвід застосування методу узагальненого параметричного дослідження складних механічних систем, у т. ч. і для дослідження ЕШО, описаний у [148–154]. Наприклад, у роботі [151] запропоновано новий підхід до ідентифікації структури і параметрів математичних і чисельних моделей взаємодії елементів складних механічних систем, а також здійснено аналіз розподілів контактного тиску, отриманих чисельними та експериментальними методами, для випадку контактної взаємодії кулі з торовидним тілом обертання.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що натеper найбільш адаптованим для дослідження міцнісних і жорсткісних характеристик складних механічних систем з урахуванням контактної взаємодії є МСЕ у поєднанні з методом узагальненого параметричного моделювання. Цей підхід і пропонується в роботі для обґрунтування проектно-технологічних параметрів розділових штампів за критеріями міцності, жорсткості, стійкості і точності виконання технологічних операцій.

1.3 Аналіз розрахункових схем та моделей елементів штампового оснащення

Важливим етапом досліджень стійкості, міцності, точності та жорсткості елементів штампового оснащення є загальна постановка задач визначення НДС деталей штампів, а в межах цього етапу – обґрунтування їхніх розрахункових схем та моделей. Для цього застосовується аналітичні, чисельні та експериментальні методи. Результатом цих досліджень є певні закономірності зміни НДС елементів штампового оснащення, а також обґрунтовані структура та параметри розрахункових схем та моделей.

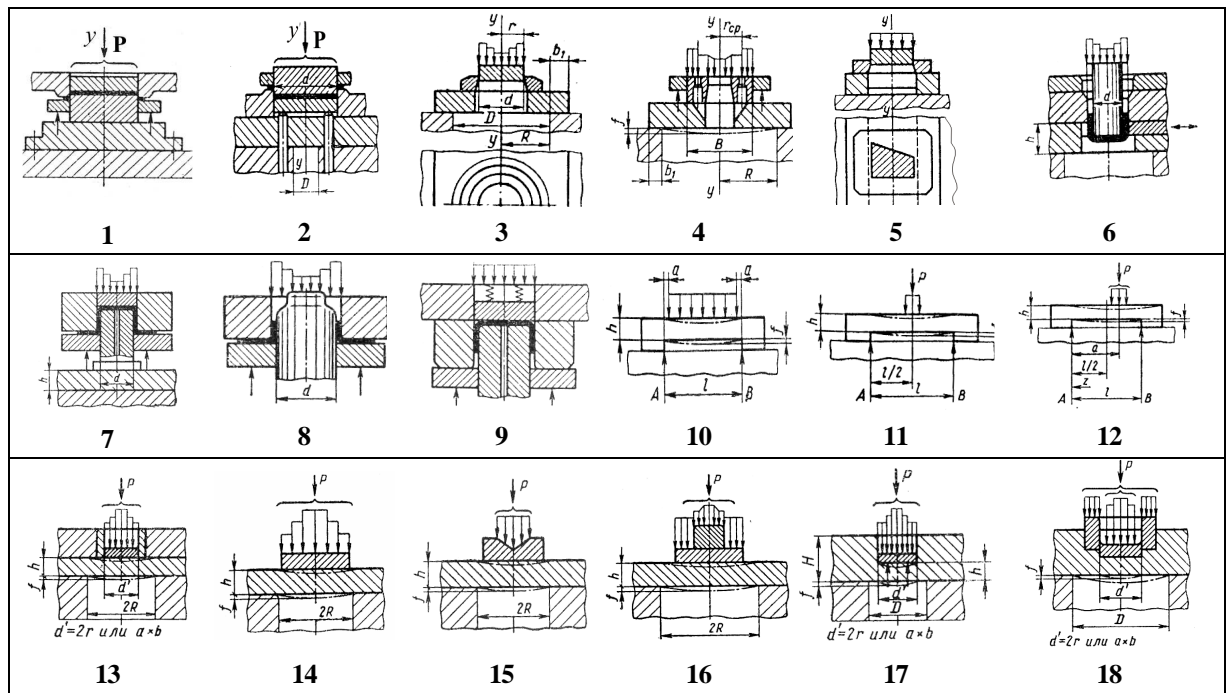
Так, у роботах [30–33, 35, 36, 92] наведені розрахункові схеми та деякі аналітичні й емпіричні залежності для розрахунків параметрів елементів штампів (табл. 1.4, 1.5). У табл. 1.4 наведені наступні схеми навантаження [31, 155]: 1 – при суцільній нижній плиті без провального отвору у підштамповій плиті; 2 – контур, що вирізається, більше отвору у підштамповій плиті; 3 – діаметр ріжучого контуру

менше діаметра отвору у підштамповій плиті; 4 – найбільший розмір ріжучого контуру менше діаметра провального отвору у підштамповій плиті; 5 – відрізана деталь або відходи видаляються зі штампа через паз нижньої плити; 6 – витяжка або протяжка циліндричного ковпачка через провальний отвір у підштамповій плиті; 7 – витяжка циліндричної деталі з фланцем без правки; 8 – разбортовка циліндричної деталі без правки фланця; 9 – витяжка некруглої коробки без правки дна; 10 – штампування з правкою деталі (незалежно від характеру технологічної операції) по всій ширині наскрізної ніші нижньої плити; 11 – штампування з правкою, зосередженою у середині плити, що має наскрізну нішу; 12 – штампування з правкою, зосередженою не по осі плити, що має наскрізну нішу; 13 – гладка плита, яка встановлена над круглим отвором та навантажена рівномірно розподіленою силою на ділянці, обмеженій площею $\pi d^2/4$; 14 – гладка плита, яка встановлена над круглим отвором та навантажена рівномірно розподіленою силою на всій площі; 15 – різновид схеми 13 із робочою ділянкою, обмеженою площею $\pi d_{прив}^2 / 4^*$; 16 – різновид схеми 14; 17, 18 – плити з круглим глухим отвором, навантажені рівномірно розподіленим силою до "жорсткого" удару при наскрізному отворі у плиті преса $\pi d^2/4$. Крім того, у роботах [32, 92] наведено наукові основи конструювання елементів штампів з урахуванням їх деформування та зміщень-поворотів (рис. 1.6). Розглянуто також вплив похибок виготовлення деталей штампа на точність базування інструменту (рис. 1.7).

Останній період (два – три десятиріччя) ознаменувався широким застосуванням комп'ютерних методів моделювання НДС елементів штампів. Зокрема, дисертаційна робота [156] спрямована на підвищення ефективності процесів штампування листових деталей. У цій роботі та у роботах [37, 58, 157–162] на основі скінченно-елементного моделювання та з використанням феноменологічних критеріїв руйнування матеріалу розроблені чисельні моделі для аналізу НДС металу заготовки при виконанні сполученого процесу формування-пробивання (рис. 1.8)

На базі розглянутого процесу формування-пробивання розроблені технологічні процеси зміцнення крайок штампованих листових деталей та одержання заклепувального з'єднання підвищеної міцності. Для аналізу НДС металу заготовки

Таблиця 1.4 – Схеми навантаження нижніх плит залежно від форми робочого контуру, характеру навантаження та конструкції опори (тут * – $d_{прив}^2 = L/\pi$, L – периметр робочого контуру) [31, 155]



Таблиця 1.5 – Формули для розрахунку сил різання залежно від форми інструменту [31, 155]

Схема процесу	Форма інструменту	Максимальна сила різання P, H
	з паралельними ріжучими кромками	$1,25BS\sigma_{cp}$
	з одинарним скосом	$0,625 \frac{S^2}{\operatorname{tg}\alpha} \sigma_{cp} (\alpha > 0)$
	зі здвоєними симетрично розташованими скосами	$1,25 \frac{S^2}{\operatorname{tg}\alpha} \sigma_{cp} (\alpha > 0)$

Одностороннє різання прямолінійними ножами

Продовження табл. 1.5

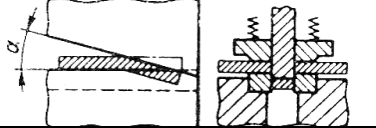
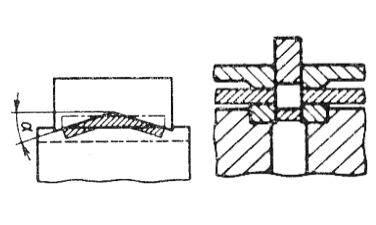
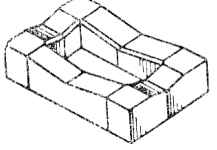
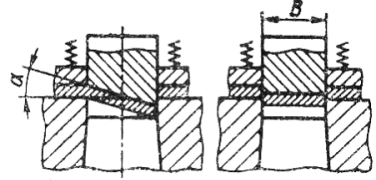
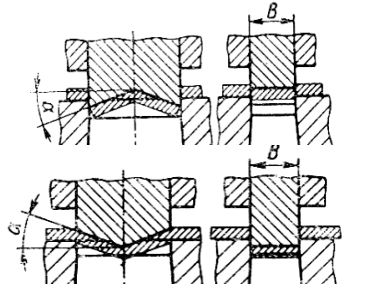
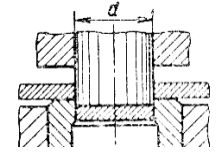
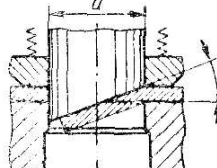
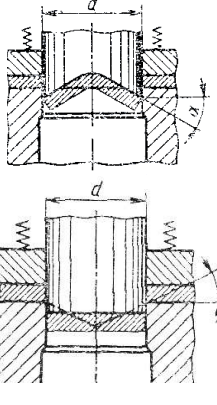
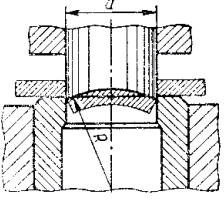
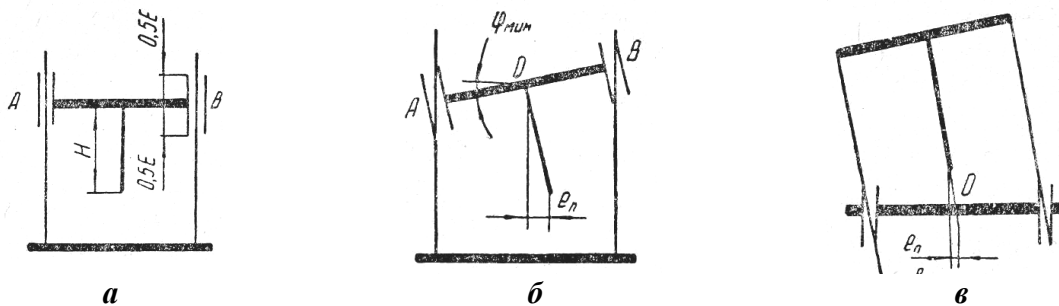
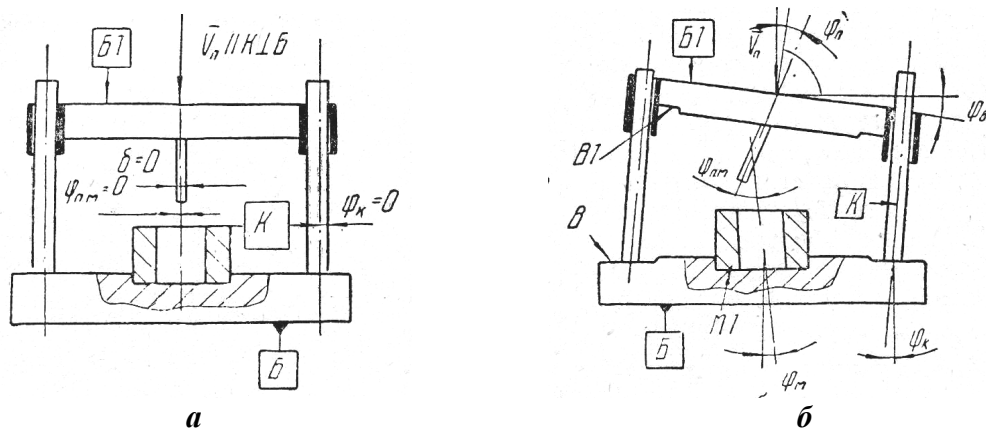
	Схема процесу	Форма інструменту	Максимальна сила різання P, H
Двустороннє різання (розрізка) матеріалу прямолінейними інструментами		з одинарним скосом	$1,25 \frac{S^2}{\operatorname{tg} \alpha} \sigma_{cp} (\alpha > 0)$
		з парними симетрично розташованими скосами	$2,5 \frac{S^2}{\operatorname{tg} \alpha} \sigma_{cp} (\alpha > 0)$
Вирізка та пробивка прямокутного контуру		багатохвильова матриця (але пуансон)	$1,25n \frac{S^2}{\operatorname{tg} \alpha} \sigma_{cp}$
		з одинарним скосом	$1,25 \sigma_{cp} S \left(B + \frac{S}{\operatorname{tg} \alpha} \right) (\alpha > 0)$
		зі здвоєними симетрично розташованими скосами	$2,5 \sigma_{cp} S \left(B + \frac{S}{\operatorname{tg} \alpha} \right) (\alpha > 0)$
Вирізка та пробивка круглого контуру		з паралельними ріжучими кромками	$1,25 \pi d S \sigma_{cp}$
		з одинарним скосом	$1,2(1 + 0,02\alpha)^2 d S \times \sigma_{cp} \arccos \frac{H - 2h_y}{H}$
		зі здвоєними симетрично розташованими скосами	$2,4(1 + 0,02\alpha) d S \times \sigma_{cp} \arccos \frac{H - 2h_y}{H}$ або $2(1 + 0,02\alpha) \times d S \sigma_{cp} h_y \times \frac{1}{H \sqrt{1 - \left(\frac{H - 0,2h_y}{H} \right)^2}}$

Схема процесу	Форма інструменту	Максимальна сила різання P, H
Вирізка та пробивка круглого контуру		$2,4(1 + 0,02\alpha)d S\sigma_{cp} \times$ $\times \arccos \frac{\sqrt{R^2 - (R - h_y)^2}}{0,5d}$
		$2,4(1 + 0,02\alpha)d S\sigma_{cp} \times$ $\times \arccos \frac{\sqrt{R^2 - (R - h_y)^2}}{0,5d}$



a – вихідний стан, b, v – після повороту (перекосу) верхньої плити

Рисунок 1.6 – Схеми штампів з розташуванням колонок в нижній (a, b) і верхній (v) плитах [92]



a – ідеальний об'єкт, b – штамп, отриманий шляхом індивідуальної обробки деталей блоку і пакета

Рисунок 1.7 – Вплив похибок виготовлення деталей штампа на точність базування інструменту [92]

при реалізації запропонованих процесів на основі МСЕ розроблені чисельні математичні моделі. На основі скінченно-елементного моделювання встановлено

вплив конструктивних та експлуатаційних параметрів ЕШО на пружні деформації його навантажених елементів [156]. У роботах [157–171] описані окремі аспекти розрахунку елементів штампів.

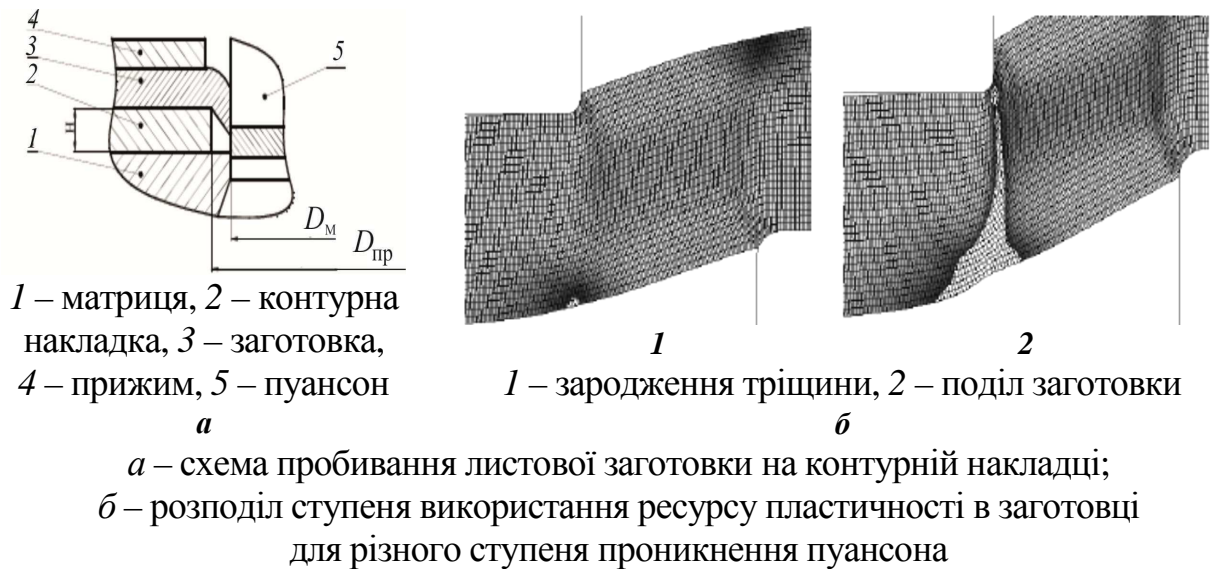


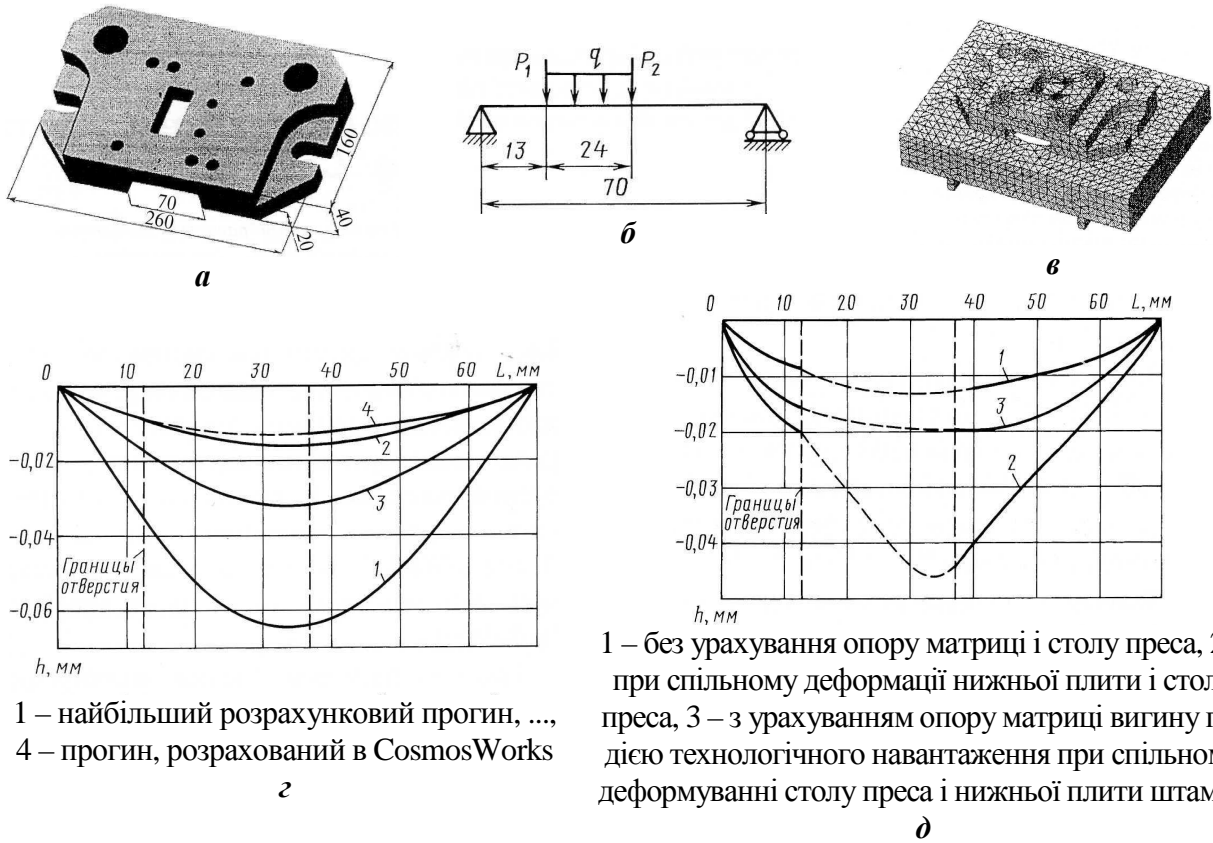
Рисунок 1.8 – До розрахункових моделей елементів штампового оснащення [162]

Зокрема, недоліки існуючих методик проектувального розрахунку елементів штампового оснащення, що сприймають технологічне навантаження, виявлені у роботі [157]. Виконано чисельне розв'язання задачі сумісного деформування елементів конструкції, що сприймають загальне навантаження. Визначено вплив висоти матриці на деформування нижньої плити штампа (рис. 1.9).

У роботі [158, 159] проаналізовано вплив конструкції штампа на НДС його елементів (рис. 1.10, *a*). Запропонована конструктивна схема, яка дає можливість суттєво знизити пружні деформації елементів штампового оснащення від технологічного навантаження (див. рис. 1.9, *б*).

Методологічні принципи математичного моделювання штампів для листового штампування обґрунтовані у [160]. Вони базуються на розрахунках із залученням як традиційних, так і більш досконалих сучасних моделей. Проте натеper вимагається більш високий рівень моделювання елементів штампів із використанням сучасних скінченно-елементних пакетів.

У низці робіт описані експериментальні та розрахунково-експериментальні дослідження елементів штампів. Методом голографічної інтерферометрії у ро-



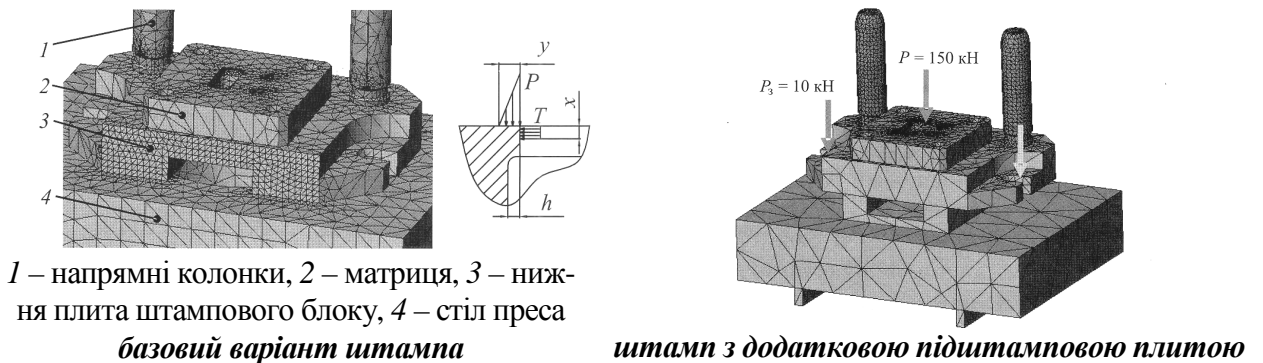
1 – найбільший розрахунковий прогин, ..., 4 – прогин, розрахований в CosmosWorks

1 – без урахування опору матриці і столу преса, 2 – при спільному деформації нижньої плити і столу преса, 3 – з урахуванням опору матриці вигину під дією технологічного навантаження при спільному деформуванні столу преса і нижньої плити штампа

a – модель нижньої плити штампового блоку у середовищі системи автоматизованого проектування SolidWorks; *б* – розрахункова схема нижньої плити штампового блоку; *в* – розрахункова схема для скінченно-елементного аналізу; *г* – прогин нижньої плити штампового блоку під дією навантажень; *д* – прогин нижньої плити штампового блоку

Рисунок 1.9 – Вплив деформування елементів штампів [159]

боті [38] отримані уточнені залежності розподілу переміщень характерних точок у досліджуваних елементах УСПШ (рис. 1.11, 1.12). Це дає можливість здійснювати верифікацію чисельних моделей для аналізу НДС їх елементів.



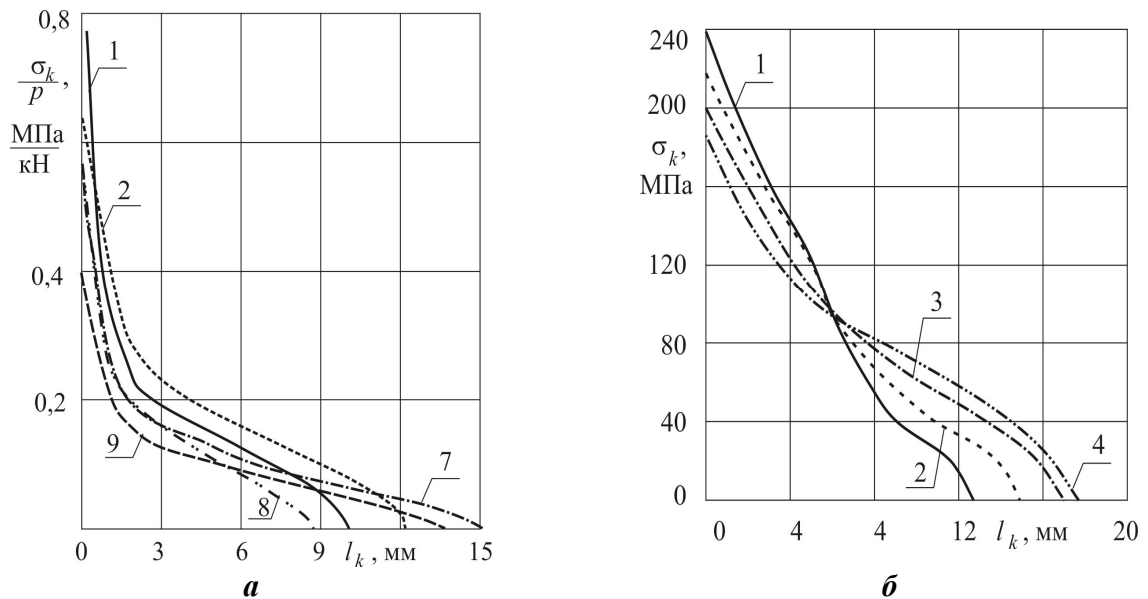
1 – напрямні колонки, 2 – матриця, 3 – нижня плита штампового блоку, 4 – стіл преса

штамп з додатковою підштамповою плитою

Рисунок 1.10 – Розрахункова схема для скінченно-елементного аналізу напружено-деформованого стану штампів [159]

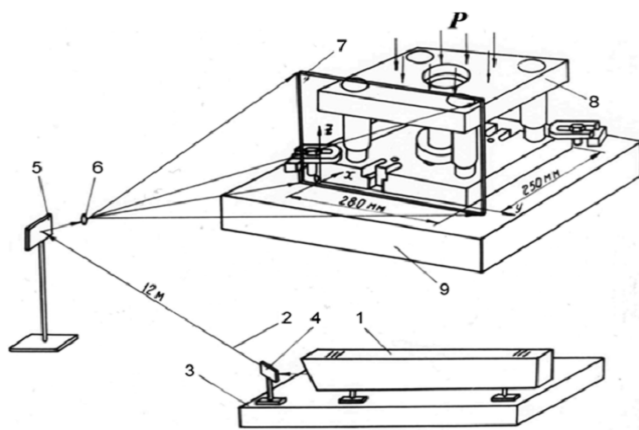
На рис. 1.12, *a* наведена схема установки, на рис. 1.12, *б* – блок розділового

переналаджуваного штампу на гідравлічному пресі [30]. На рис. 1.13, 1.14 – приклад інтефрограми та її розшифровка [30].



a – розрахунковий контактний тиск для різних наборів конструктивних параметрів базових плит; *б* – результати експериментального визначення контактної тиску для різних товщин базових плит

Рисунок 1.11 – Розподіл контактних напружень у зоні контакту нижньої базової плити з підштамповою плитою пресу [30]



1 – лазер ЛГН-125; 2 – промінь лазера; 3 – станина;
4, 5 – дзеркала; 6 – розширювач лазерного пучка;
7 – реєструюче середовище; 8 – блок УСПШ

a



б

a – схема експериментальної установки; *б* – блок РПШ на гідравлічному пресі П-125

Рисунок 1.12– До експериментального дослідження блоків РПШ [30]

Для подальшого аналізу також були залучені матеріали виробничих досліджень РПШ методом динамічної тензометрії [30]. Для цього були застосовані фольгові тензорезистори типу КФ5 П1-5-100-А-12, наклеєні за схемою, наведе-

ною на рис. 1.15. Для фіксації використані тензометричні підсилювачі ТА-5, шлейфові світлопроміневі осцилографи Н041 та перемикач датчиків ПД-100М.

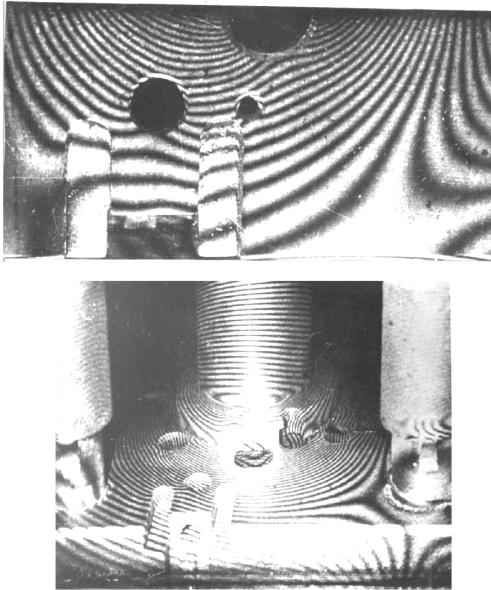


Рисунок 1.13 – Голографічна інтерферограма робочої поверхні нижньої базової плити при перепаді сили штампування $\Delta P = 125$ кН [30]

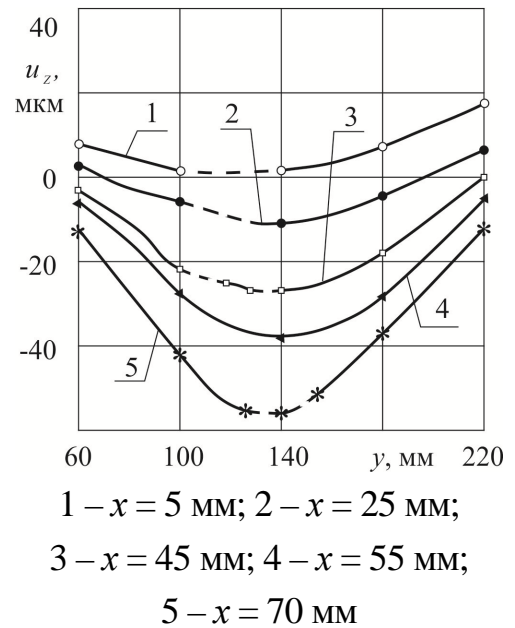


Рисунок 1.14 – Розподіл прогинів плити уздовж осі у [30]

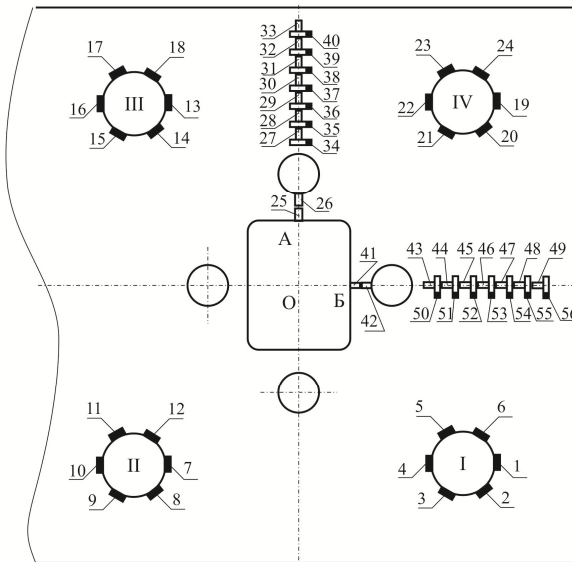


Рисунок 1.15 – Схема наклейки тензорезисторів на елементи РПШ [30]

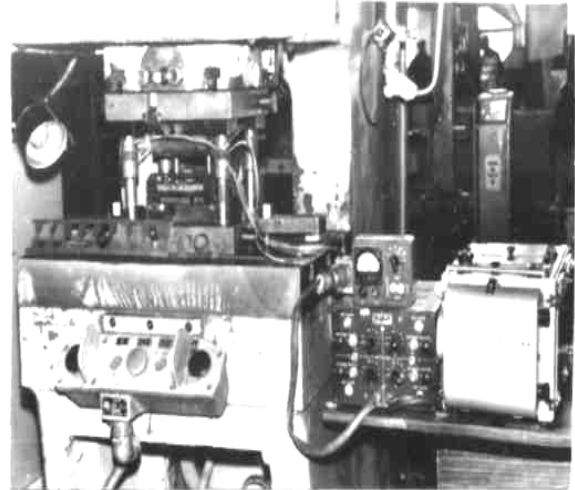


Рисунок 1.16 – Розділовий штамп с наклеєними тензорезисторами у процесі досліджень [30]

Штамп був розміщений на столі кривошипного преса К-2186 зусиллям 500 кН. Штампувалися шайби із матеріалу Ст.3 товщиною 5 мм діаметрами до 49 мм (рис. 1.16). Крім того, здійснювалися випробування на пресі К1430 зусиллям 1 МН (рис. 1.17).

На рис. 1.18 як ілюстрація наведено розподіл згинних напружень у нижній базовій плиті розділового переналагоджуваного штампу [30]. Як відмічено, криві згруповані відповідно до схеми тензорезисторів на рис. 1.15 (перша група тензорезистори – від 25-го до 33-го, друга – від 34-го до 40-го, третя – від 41-го до 49-го, четверта – від 50-го до 56-го). При цьому криві 1–4 зафіксовані при вирубці деталей із сталі 45 товщиною 5 мм, а 1'–4' – на холостому ході преса [30].

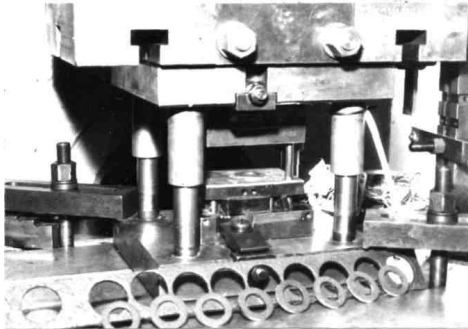
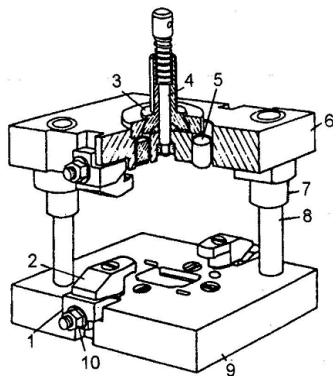


Рисунок 1.17 – Виробничі випробування РПШ на пресі КІ430 [30]



1 – клиновий затиск, 2 – прихоплювач, 3 – хвостовик, 4 – виштовхувальний пристрій, 5 – фіксатор, 6 – верхня плита, 7 – напрямна втулка, 8 – напрямна колонка, 9 – нижня плита, 10 – гайка

Рисунок 1.19 – Універсальний блок [163]

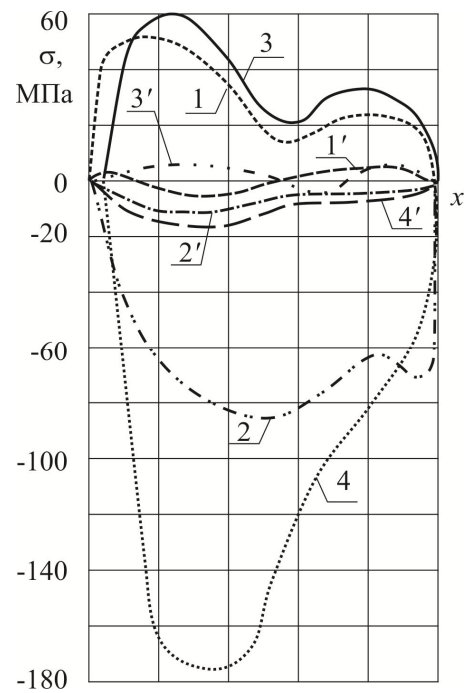


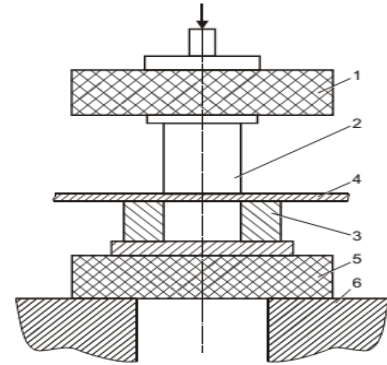
Рисунок 1.18 – Розподіл згинних напружень у нижній базовій плиті РПШ [30]

У статтях [163–165] наведені конструктивно-технологічні особливості і результати досліджень зношування формотвірних елементів в залежності від матеріалу і кількості вироблених деталей (рис. 1.19). Встановлено, що зношування формотвірних елементів призводить до збільшення зазору між елементами, що здійснює істотний вплив на величину пружинення, збільшуючи його кут. У роботі [166] розроблені математичні моделі розрахунку силової взаємодії базових деталей і визначені навантаження, що діють на опорні плити універсально-

збірних штампів, необхідні для розрахунку їх на міцність (рис. 1.20). Встановлено, що величина сили, яка діє на колонки, може бути суттєвою, тому при розрахунку основних елементів штампів на міцність необхідне урахування горизонтальної складової сили.

- 1 – верхня плита штампа; 2 – пуансон;
- 3 – матриця; 4 – смуга, що штампується;
- 5 – нижня плита штампа;
- 6 – підштампова плита

Рисунок 1.20 – Схема контактної взаємодії конструктивних елементів штампа [166]



У статті [167] розглянуто питання впливу похибок виготовлення і складання деталей спеціалізованих переналагоджуваних штампів для гнуття на точносні параметри штампованих деталей. Розроблені СПШ є конструкціями високої точності, що дає можливість отримувати штамповані деталі з точносними параметрами до 7-9 квалітетів. Встановлено, що точність виготовлення і збирання блоків СПШ характеризується похибками виготовлення і встановлення напрямних елементів, а також паралельністю опорних поверхонь базових плит. Наявність зазорів у ланках СПШ, необхідних для складання блоків за допомогою епоксидного компаунда, дозволило використовувати їх як ланки-компенсатори, що, в свою чергу, дало можливість збільшити поля допусків на виготовлення деталей СПШ.

Різні способи нанесення зміцнювальних покриттів на робочі елементи штампів (іонно-плазмовий метод, іонна та плазмохімічна імплантації, детонаційно-газовий метод) і оцінений вплив цих способів на підвищення стійкості штампів розглянуті у статті [168]. Встановлені необхідні характеристики зміцнюючих детонаційних покриттів і визначені найбільш перспективні покриття. Це важливе з точки зору дослідження напрямних елементів РШ.

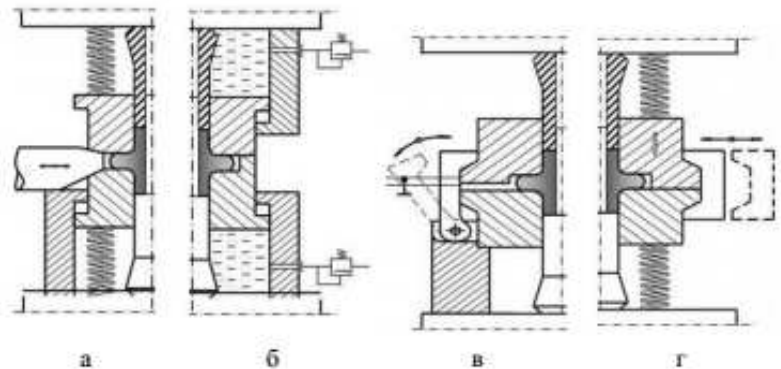
Методика оцінки довговічності інструменту для холодного листового штампування, яка враховує пружні деформації обладнання при виконанні технологічної операції та взаємний вплив двох руйнівних процесів, що протікають у робочих деталях штампа – зношування і втоми, розроблена у [169]. Запропоно-

ваний підхід дозволив обґрунтувати комплекс обов'язкових експериментів, які необхідно проводити перед тим, як рекомендувати заходи (нові матеріали, термо- і поверхневі обробки) щодо підвищення стійкості інструменту для холодного листового штампування.

У роботі [31] зазначено, що незважаючи на недоліки, властиві використуванним різними авторами моделям і методам, вони, тим не менш, мають велику цінність з точки зору зручності для практичного застосування і як джерела тестових результатів. Наприклад, у монографії Г.Д. Скворцова [155] розглядається процес розділення матеріалу в штампах, раціональна геометрія робочих ріжучих частин (матриць, пуансонів), а також сили та їх розподіл при розділових операціях (див. рис. 1.5). Це служить основою для подальшого дослідження базових плит, пуансонів і матриць (див. табл. 1.5). У результаті виходять або розрахункові схеми елементів штампного оснащення, або методики дослідження їх НДС, або готові до використання формули для визначення напружень, деформацій, критичних сил, а також рекомендації щодо вибору основних конструктивних і технологічних параметрів.

У роботі [170] розроблено класифікацію штампів з роз'ємними матрицями для холодного видавлювання та систематизовані конструкції затискних вузлів для рухомих і нерухомих матриць. Відмінними ознаками затискних вузлів є передача сил розкриття роз'ємної матриці на повзун преса або її замикання в затискному вузлі, а також конструктивне виконання у вигляді пружинних, гідравлічних, важільних, байонетних або клинових пристроїв. Запропоновано нові способи і штампи видавлювання, що полегшують розкриття матриці за рахунок здійснення технологічного прийому підсадки, що дозволяє також підвищити точність штампованих деталей, надійність роботи і стійкість штампного оснащення. Розробки затискних вузлів дозволяють оптимізувати процес конструювання штампів, спростити конструкції штампів видавлювання, скоротити час проектування, розширити технологічні можливості видавлювання в штампах з роз'ємними і рухливими матрицями. Відмічено, що з точки зору зниження енерговитрат більш кращі схеми з механічними замикальними елементами (рис. 1.21, в, г), що спри-

яють замикання сил розкриття матриці у штамповому блоці без їх передачі на повзун преса. Вузли замикання можуть бути виконані при цьому у вигляді скоб (засувок), поворотних кулачків або втулок, байонетних роз'ємів механізмів тощо. Із множини існуючих і можливих конструктивних схем штампів з роз'ємними матрицями виділяються окремі групи штампів, що відрізняються розташуванням роз'ємної матриці (верхнє або нижнє) і площини роз'єму (рис. 1.22) [171].



а – штампи з замикаючими вузлами, виконаними у вигляді пружного елемента або буферного пристрою, розміщеного в просторі штампа; б – штампи при використанні пневмо- або гідроциліндрів; в, г – схеми штампів з механічними замикаючими елементами

Рисунок 1.21 – Схеми штампів з замикаючими елементами [170]

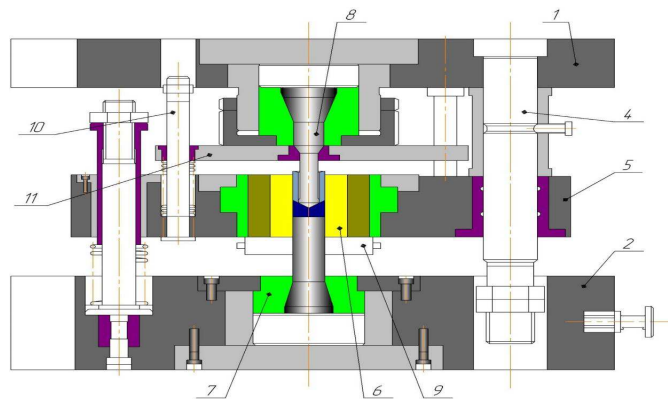


Рисунок 1.22 – Штмп для наскрізного прошивання деталей типу втулки [171]

Таким чином, можна визначити широкий спектр розрахункових схем елементів штампового оснащення, які розроблені та використовуються дослідниками. Разом з тим слід зазначити, що усі ці схеми не вичерпують усього різноманіття умов взаємодії елементів штампів. Зокрема, недостатньо адекватно моделюються умови множинного контакту елементів штампів. Отже, ці "вузькі місця"

потребують усунення, що висуває на перший план розробку системного підходу до створення математично строгих та фізично адекватних розрахункових схем та моделей елементів штампового оснащення.

Висновки за розділом 1. Постановка задач досліджень

Аналіз результатів огляду літературних джерел дає підставу для наступних висновків.

1. Штампове оснащення є центральним елементом технологічної системи "прес – штамп – формувальні 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 штампового оснащення його напружено-деформований стан під дією сил штампування.

2. Аналіз розділових штампів для холоднолистового штампування свідчить, що конструктивно вони складаються з набору контактуючих один з одним під дією сил штампування численних елементів блоків та пакетів. Для визначення НДС 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 визначенні системи пружних деформівних тіл, яка, проте, у розглянутих роботах на належному рівні не ставилась и не розв'язувалась

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

4. На сьогодні задача розробки достовірних розрахункових схем елементів штампового оснащення розв'язана далеко не повністю. Особливо це стосується

коректного врахування множинного контакту.

Як узагальнюючий можна зробити висновок про те, що на теперішній час задача розробки методів аналізу НДС ЕШО з урахуванням контактної взаємодії та обґрунтування на цій основі раціональних проектно-технологічних рішень при проектних дослідженнях штампів розв'язана не повною мірою. Відповідно, визначений напрямок становить актуальну науково-технічну задачу, розв'язання якої становить мету цієї дисертаційної роботи.

Грунтуючись на аналізі існуючих методів і моделей, для розробки методів розрахунку ЕШО визначені наступні задачі дисертаційних досліджень.

1. Обґрунтувати методи та засоби досліджень елементів штампів для холоднолистового штампування.

2. Розробити вдосконалену математичну модель НДС елементів РШ з урахуванням множинної контактної взаємодії, а також інтегрувати у неї варійовані і контрольовані параметри, 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 елементів штампового оснащення, здійснити аналіз та узагальнення виявлених фізичних особливостей у розподілі компонент НДС.

3. Здійснити розрахунково-експериментальні дослідження НДС і контактної взаємодії елементів розділових штампів та розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору конструктивних і технологічних параметрів штампів.

4. Впровадити результати досліджень у виробництво.

Результати розділу висвітлені у роботах [1–29].

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАПРЯМКІВ ТА ЗАСОБІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обґрунтування основних напрямків досліджень для синтезу проектно-технологічних рішень при розробці елементів штампового оснащення

Проведений аналіз стану методів дослідження напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення (див. розд. 1) дає підстави для висновку про те, що вони на сьогодні не отримали достатнього розвитку. У всякому разі, потреби практики вимагають розробки нових підходів, методів і моделей, які враховують основні значущі фактори, а також можуть бути покладені в основу проектно-технологічних рішень при розробці штампів, зокрема, для розділових операцій листового штампування.

Аналіз конструкцій і умов експлуатації розділових штампів для операцій листового штампування, а також підходів, методів і моделей для дослідження міцності, стійкості, жорсткості і точності виконання технологічних операцій, описаних у літературі (див. розд. 1), дає можливість відокремити найбільш значущі проблемні моменти:

- аналіз міцнісних і жорсткісних характеристик елементів штампового оснащення повинен здійснюватися з урахуванням їх контактної взаємодії, причому множинної, оскільки штамп є набором множини деталей, що перебувають у силовому та кінематичному сполученні один з одним, з елементами преса та з деталлю (заготовкою), що штампується,;

- особливістю взаємодії елементів штампового оснащення є їх контакт на узгоджених поверхнях (у більшості – плоских); відповідно, вимагає особливої уваги визначення впливу сили штампування на розподіл контактних зон і контактного тиску у сполученнях елементів штампового оснащення;

- враховуючи, що технологічний процес штампування за своєю природою є динамічним, потребує аналізу тип математичної моделі, що адекватно описує розподіл сил штампування і компонент напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення за часом.

Відповідно, виділяються наступні напрямки досліджень:

- 1) аналіз номенклатури штампованих деталей, конструкцій і умов експлуатації розділових штампів для листового штампування;
- 2) розробка математичних моделей дослідження елементів штампового оснащення з урахуванням їх множинної контактної взаємодії;
- 3) аналіз динамічних характеристик елементів штампового оснащення з метою визначення можливості або недоцільності квазістатичної або повної динамічної постановки задачі визначення їх напружено-деформованого стану;
- 4) побудова чисельних моделей, алгоритмів та програмного забезпечення для комп'ютерного моделювання міцності, стійкості, жорсткості і точності виконання технологічних операцій штампування;
- 5) розрахунково-експериментальні дослідження напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення, розробка рекомендацій з обґрунтування проектно-технологічних параметрів розділових штампів для листового штампування.

Відповідно, виділяються наступні етапи і завдання досліджень:

- розробка теоретичних основ досліджень, а також структури спеціалізованого програмно-модельного комплексу, що реалізує теоретичні розробки.
- розв'язання низки прикладних задач для обґрунтування рекомендацій із вибору проектно-технологічних параметрів розділових штампів.
- розрахунково-експериментальні дослідження елементів штампового оснащення з метою обґрунтування достовірності та точності отриманих результатів, а також впровадження результатів дисертаційних досліджень у ви-

робництво.

2.2 Вибір методів теоретичних досліджень напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення та обґрунтування напрямків їх вдосконалення

Як видно з аналізу більшості сучасних досліджень напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення, описаних у літературі, вони в основному спираються на скінченно-елементне моделювання [141] у середовищі потужних програмних комплексів типу ANSYS, Abaqus, Femap, Nastran і т. п. Безсумнівною перевагою такого шляху є відпрацьованість програмного забезпечення для розв'язання задач аналізу. Більш того, можливе також розв'язання задач параметричного аналізу, різноманітних досліджень з варіюванням розрахункових схем, форми і розмірів деталей штампів і штампованих деталей, їхньої товщини і властивостей матеріалів. І, нарешті, існуючі програмні комплекси можуть реалізовувати різні оптимізаційні процедури. Таким чином, склалася ситуація уявної можливості вирішення будь-яких завдань, пов'язаних з проектуванням штампів для листового штампування. Однак при всій привабливості чисельних рішень їм властиві також і принципові недоліки (див. розд. 1).

По-перше, серед цих недоліків слід виділити ту обставину, що в ході чисельних досліджень при встановленні залежностей міцнісних, жорсткісних, точнісних і стійкісних характеристик необхідне, на відміну від аналітичних моделей, здійснення розв'язання великого масиву задач аналізу напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення. При цьому чим більша кількість варійованих параметрів, тим непропорційно більше необхідно розв'язувати задач аналізу.

По-друге, серед варійованих параметрів присутні форма і розміри шта-

мпованих деталей, властивості штампуемого матеріалу, і, відповідно, сили штампування. Якщо, як впливає із традиційних підходів, додати цю множинну параметрів у число варійованих, то одержувана модель стає надзвичайно громіздкою і для вирішення задач аналізу, і, тим більше, – синтезу. Таким чином, якщо вплив усіх цих чинників звести до урахування всього декількох параметрів, то тим самим різко зменшиться розмірність параметричного простору з подальшим спрощенням задач синтезу.

По-третє, слід зазначити, що в основі розв'язання задач синтезу лежить задача аналізу напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення з урахуванням контактної взаємодії, що є в загальному вигляді суттєво нелінійною, а, значить, і ресурсомісткою з точки зору необхідних обчислювальних ресурсів. Природно, що актуальною є проблема зниження кількості розв'язуваних задач. Найкращим рішенням при цьому було б установлення аналітичних залежностей, оскільки вони дають можливість визначати характерні тенденції зміни контрольованих характеристик при варіюванні проектно-технологічних параметрів на основі обмеженого масиву чисельних розв'язків задач аналізу.

По-четверте, важливим аспектом досліджень є визначення типу задачі аналізу – зводиться вона до початково-крайової чи до крайової (див. розд. 1). Іншими словами, чи потрібна в цьому випадку повна динамічна постановка, чи можна обмежитися квазістатичною?

Комплекс заявлених досліджень і проблемних питань передбачає залучення та розвиток відповідних теоретичних розробок. Зокрема, заявлені проблемні теоретичні аспекти ініціюють наступні теоретичні розробки:

1) для забезпечення варіативності досліджуваних елементів штампового оснащення адаптується і розвивається метод узагальненого параметричного моделювання [146]. Зокрема, як варійовані залучаються:

- конструктивні рішення блоку і пакету штампа,
- габаритні розміри в плані елементів штампів та їхні товщини,

- конфігурація, товщини та властивості штампованих деталей.

Основною властивістю даної розробки є можливість побудови геометричної і розрахункової моделей елементів розділового штампа. Це, в свою чергу, забезпечує багатоваріантність розв'язків на етапі проектних досліджень, які є підставою для прийняття раціональних конструктивних і технологічних рішень.

2) як метод аналізу напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення з урахуванням контактної взаємодії залучається метод скінченних елементів, доповнений параметричним моделюванням. Якраз саме ця компонента істотно розширює функціональні можливості моделювання, оскільки дає можливість не прив'язуватися до конкретного програмного комплексу, що реалізує МСЕ, а використовувати будь-який із них. Тим самим підвищуються можливості аналізу.

3) для аналізу особливостей залежностей компонент напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення від сили штампування задіяний метод варіаційних нерівностей. Виходячи з постановки задачі про контакт елементів штампового оснащення за узгодженими поверхнями як проблеми мінімізації функціонала повної внутрішньої енергії системи на множині у вигляді нерівностей, які описують умови непроникнення контактуючих тіл одне в одного, показало, що контактний тиск приблизно лінійно залежить від сили штампування, а зона контакту є практично незмінною при зміні цієї сили. Це дає можливість установлення чисельно-аналітичних залежностей компонент НДС елементів штампового оснащення від проектно-технологічних чинників: від їх частини залежності визначаються чисельно, а від сили штампування – за лінеаризованою залежністю. Цим самим досягається різке скорочення обсягу проведених розрахунків. Крім того, для різноманітних чинників, які визначають форму, розміри і властивості матеріалів штампованих деталей, можна ввести єдиний чисельний представник – величина сили штампування. Це ще більше скорочує обсяг необхідних досліджень.

4) аналіз динамічних характеристик елементів штампового оснащення здійснюється методом скінченних елементів. Для цього також задіяна технологія параметричного моделювання. Параметризовані моделі базових плит і блоків розділових штампів дають можливість визначити їх спектри власних частот і власних форм коливань в залежності від проектних параметрів.

5) визначення на основі технології параметричного моделювання із залученням скінченно-елементних моделей впливу окремих параметрів на міцнісні, стійкісні, жорсткісні та точнісні характеристики ЕШО.

Чисельна реалізація розроблених математичних моделей здійснюється за допомогою створеного спеціалізованого програмно-модельного комплексу. Цей комплекс складається, з одного боку, з універсальних програмних продуктів, які забезпечують широкі можливості аналізу напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення, а, з іншого боку, – зі спеціалізованих модулів, які спрямовані на створення моделей конкретних елементів штампового оснащення.

Таким чином, розроблено комплексний теоретичний базис для розв'язання задач обґрунтування технічних рішень при розробці елементів штампового оснащення. Він має ширші (порівняно з традиційними підходами) можливості розв'язання задач синтезу раціональних проектно-технологічних параметрів розділових штампів для технологічних операцій листового штампування.

2.3 Обґрунтування вибору методів експериментального дослідження напружено-деформованого стану елементів розподілових штампів

Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення є складною задачею. Це пояснюється тим, що розділові штампи як об'єкт досліджень є багатокомпонентною складною ме-

ханічною системою, а деталі штампів знаходяться у контактній взаємодії одна з одною, з пресом і матеріалом, що штампується. При цьому ускладнений доступ до цих деталей, а також розміщення на них різних датчиків. Таким чином, пряме вивчення НДС елементів штампового оснащення в цьому випадку затруднено. У зв'язку з цим пропонується комплекс частинних досліджень, що поєднують контактні та безконтактні методи визначення компонент напружено-деформованого стану.

Зокрема, для якісного аналізу розподілу компонент напружено-деформованого стану в зоні контактування елементів штампового оснащення залучається метод фотоупружності. Він дає можливість за лініями рівних різниць головних напружень визначати якісну картину розподілу та кількісну оцінку напружень у тілі окремих деталей і на їх границі. Вони порівнюються з відповідними величинами і розподілами напружень, отриманими розрахунковим шляхом. Це дає можливість визначити невідповідність чисельно й експериментально отриманих даних, тим самим оцінити точність отриманих розрахункових результатів.

Для визначення просторово-часового розподілу деформацій і напружень у деталях елементів штампового оснащення найчастіше застосовується метод електротензометрії. Він полягає в наклеїці на поверхню досліджуваної деталі дротових або інших датчиків, електричний опір яких при розтягнанні-стисканні змінюється приблизно за лінійною залежністю від деформації. Маючи дані про розтягання-стискання уздовж кількох напрямків, можна за співвідношеннями узагальненого закону Гука обчислити компоненти тензора напружень. Сукупність часових розподілів напружень у різних точках надає інформацію для порівняння з просторово-часовими полями, що отримуються розрахунковим шляхом.

Для реалізації тензометричних вимірювань були використані дротові тензорезистори типу КФ-5 з базою 5 мм, підключені до тензометричним приладів ІСД-3 та СІТ-3 (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Обладнання для експериментальних досліджень методами електротензометрії та безпосередніх вимірювань індикаторами переміщень годинникового типу

Окрім вимірювання деформацій, тензометри можуть бути використані для вимірювання діючих сил. Для цього вони наклеюються на деформовану при навантаженні деталь, розміщену між навантажуючим і навантаженим елементами. За ступенем показання тензометра можна обчислити діючу силу. Такий пристрій, який називають месдозою, попередньо тарується, наприклад, за допомогою зразкових динамометрів.

Результати тензометричних вимірювань у роботі були використані для аналізу часового розподілу сили штампування на пресі, а також для визначення напруженого стану елементів штамів. Крім того, для імітації сили штампування на стенді була використана месдоза, оснащена тензодатчиками.

Одним із ефективних сучасних методів експериментальних досліджень є голографічна інтерферометрія. Вона передбачає в одному з варіантів по-

двійну експозицію досліджуваного об'єкта – до і після навантаження. На кожному з етапів фіксується накладення предметної та опорної хвилі. Вони створюються лазерним випромінюванням. У результаті на інтерферограмі об'єкта фіксуються у вигляді картини смуг розподіли переміщень точок видимої частини поверхні досліджуваного елемента. Це поле переміщень можна зіставити з чисельно визначеним.

Зокрема, для отримання інтерферограм елементів штампів був використаний стіл інтерферометричний СІН-1, оснащений гелій-неоновим лазером ЛГН-215 з довжиною хвилі 0,628 мкм.

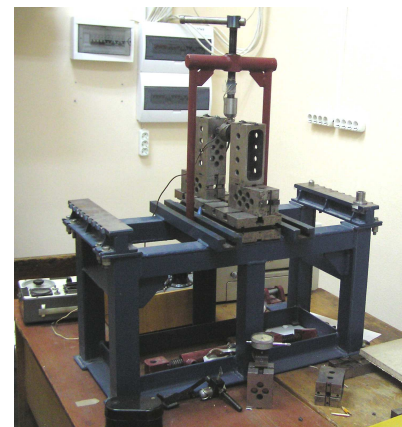
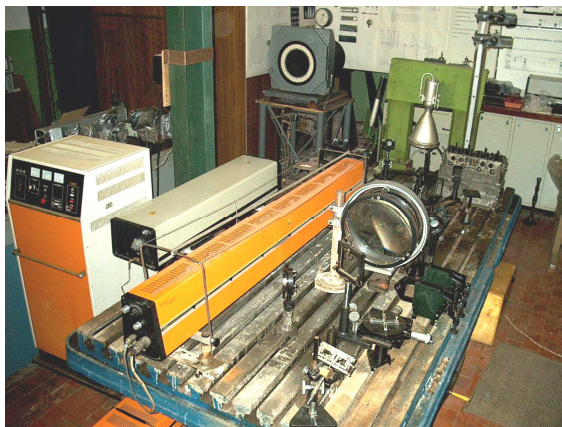


Рисунок 2.2 – Обладнання для експериментальних досліджень методом голографічної інтерферометрії та контактних відбитків

Для аналізу контактного тиску між елементами штампового оснащення залучаються чутливі до тиску плівки, зокрема фірми Fuji . Ці плівки реагують на тиск, змінюючи інтенсивність колірного фарбування в залежності від рівня контактного тиску. Розміщуючи плівки між контактуючими ЕШО, отримуємо кольорові відбитки, які можна розшифрувати за калібрувальними таблицями. Ці поля контактних тисків порівнюються з визначеними в ході чисельних досліджень.

Таким чином, використання різних методів експериментальних досліджень дає можливість проаналізувати різноманітні компоненти їх напруже-

но-деформованого стану. Саме таке розмаїття та надмірність дає підставу для забезпечення більш високого рівня достовірності одержуваних результатів, оскільки є можливість порівняння з результатами чисельних досліджень, і з іншими експериментально отриманими даними.

Висновки за розділом 2

Етап обґрунтування та вибору методу і засобів досліджень елементів штампового оснащення, який є відповідальним з точки зору результативності вирішення поставлених задач, дає можливість також уточнити їхній характер і особливості. Зокрема, виділяються окремі підзадачі, на розв'язання яких, в першу, чергу спрямовані основні зусилля.

1. Розробка нових і удосконалених підходів, методів і моделей для дослідження міцності, стійкості, жорсткості і точності елементів штампового оснащення. При цьому основна увага приділяється:

- розвитку та адаптації узагальненого параметричного моделювання до дослідження процесів і станів елементів штампового оснащення;
- теоретичний аналіз особливостей напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення з урахуванням їх множинної контактної взаємодії;
- визначення динамічних характеристик елементів штампового оснащення з метою обґрунтування типу задач аналізу їх напружено-деформованого стану;
- розробка структури програмно-модельного забезпечення, що реалізує запропоновані теоретичні розробки.

2. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення. При цьому акцентується увага на вирішенні наступних завдань:

- визначення спектра власних частот і форм коливань елементів штампового оснащення для обґрунтування можливості квазістатичної постановки задачі визначення їх напружено-деформованого стану;

- аналіз напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення при їх множинному контакті з залученням розрахункових моделей різного рівня деталізації;

- установлення основних закономірностей впливу окремих параметрів на міцність, стійкість, жорсткість і точність виконання технологічних операцій на розділових операціях листового штампування та розробка рекомендацій з обґрунтування проектно-технологічних параметрів елементів штампового оснащення.

3. Здійснення експериментальних досліджень елементів штампового оснащення з вичлененням наступних питань:

- характер часових розподілів сили штампування, діючих на деталі розділових штампів;

- картини розподілу контактного тиску у сполученнях елементів штампового оснащення;

- просторово-часові розподіли компонент напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення;

- аналіз точності результатів чисельних досліджень в зіставленні з даними експериментальних досліджень.

4. Впровадження результатів дисертаційних досліджень у виробництво.

Результати розділу висвітлені у роботах [1–9, 11–29].

3 НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ ПРИ МНОЖИННІЙ КОНТАКТНІЙ ВЗАЄМОДІЇ

3.1 Загальна постановка задач досліджень напружено-деформованого стану елементів розділових штампів

Для визначення характеристик стійкості елементів розділових штампів і точності виконання технологічних операцій вибивки-пробивання необхідно дослідити напружено-деформований стан елементів цих штампів (див. розд. 1, 2). При цьому найбільш проблемними є два чинники. По-перше, у традиційних математичних моделях, а також у ході чисельного моделювання, наприклад, із залученням САЕ-систем типу ANSYS, відсутні механізми прямої інтеграції всієї множини варійованих і контрольованих параметрів. По-друге, важливо промоделювати, причому якомога більш адекватно і точно, множинні контактні взаємодії елементів штампів між собою. І, нарешті, створювану математичну модель необхідно реалізувати у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу.

Вихідний зміст проблемних питань багато в чому породжується самим характером проектних розробок штампового оснащення. На етапі проектних робіт враховується не тільки номенклатура і обсяг штампованих деталей, які планується виробляти на тому чи іншому пресі, але і різні виробничі, організаційні, економічні та інші вимоги. Крім того, під час швидко мінливих умов навіть у період проведення проектних робіт та виготовлення оснащення умови, потрібні характеристики, критерії та обмеження, що висуваються споживачами, а також диктуються ринком, можуть варіюватися, причому істотно. Це різко відрізняє ситуацію від недавнього минулого, коли можна було орієнтуватися на великі серії і незмінну номенклатуру виробів, що випускаються.

Відповідно, потрібна концепція змінюваності та адекватності ЕШО. Вона на зрізі конструкції знайшла відображення в переналагоджуваному штаповому оснащенні. Зокрема, переналагоджувані розділові штампи можуть швидко переналаштовуватися на нову номенклатуру. З економічної точки зору це дає істотне зниження витрат за рахунок повторного використання блоків, тобто потрібна заміна тільки змінного пакету (див. розд. 1).

У той же час залишається відкритим питання варіативності на етапі проектних досліджень. Крім того, у нових моделях необхідно врахувати наявність множинних контактів, а також побудувати на цій базі чисельні моделі.

Усі перераховані задачі знайшли свій опис далі в підрозділах 3.2–3.7.

Розроблену і описану раніше комплексну математичну модель напружено-деформованого стану елементів штапового оснащення пропонується реалізовувати у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу. Із застосуванням створеного спеціалізованого програмно-модельного комплексу розв'язуються низка прикладних задач обґрунтування проектно-технологічних параметрів елементів розділових штампів, у першу чергу – базових плит. Зокрема, пропонується визначити спектр власних частот коливань (ВЧК) елементів штампів і його зміну при варіюванні проектно-технологічних параметрів, а також напружено-деформований стан базових плит у взаємодії з пакетом та більш детально – у зоні сполучення напрямних колонок з базовими плитами. Крім того, із залученням моделі більш високого рівня складності розв'язані задачі визначення напружено-деформованого стану блоку розділового штампа. На додаток, будуть виявлені закономірності зміни НДС, зон контактування і розподілу контактного тиску при варіюванні проектно-технологічних параметрів штампів (див. далі у розділі).

Слід зазначити, що розв'язання дослідницьких задач націлене на отримання не стільки конкретних результатів для конкретних штампів, а встановлення загальних закономірностей зміни компонент напружено-деформованого стану при варіюванні тих чи інших параметрів. У зв'язку з цим діапазон їхньо-

го варіювання може перевищувати реально спостережувані на практиці границі проектування елементів штампного оснащення. Це необхідно з точки зору повноти картини встановлюваних залежностей, тенденцій, які реалізуються при їх великих і малих значеннях.

При використанні розробленого спеціалізованого програмно-модельного комплексу у складі САПР оснащення вони працюють, як правило, у режимі "запит – відповідь". Тим не менш, враховуючи наведені аргументи, у підрозд. 3.7 представлені результати досліджень у більш широкій постановці.

3.2 Параметричні математичні моделі напружено-деформованого стану елементів розділових штампів

Як уже зазначалося вище (див. підрозд. 3.1), ключовими технічними показниками штампів є точність виконання технологічних операцій, а також стійкість протягом тривалого терміну експлуатації і при великому обсязі штампованих деталей. Зокрема, з точки зору забезпечення точнісних і стійкісних характеристик найбільший вплив має напружено-деформований стан елементів штампного оснащення з урахуванням їх множинної контактної взаємодії. Виходячи з цього, у розд. 3 представлені математичну і чисельну моделі для розв'язання цієї задачі. Однак, перед побудовою моделі НДС, що враховує, так би мовити, "фізичну" сторону процесу, необхідно створити інструмент опису ЕШО з точки зору проектної, тобто як елемента широкої множини об'єктів. Базуючись на цьому аспекті, на першому етапі розглянута методологія параметризації при моделюванні напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення.

При описі математичної моделі напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення можна виходити із загального операторного подання:

$$L(\mathbf{u}, \boldsymbol{\sigma}, f, t) = 0, \quad (3.1)$$

де L – оператор початково-крайової задачі,

$\mathbf{u}, \boldsymbol{\sigma}$ – вектор переміщень і тензор напружень елементів штампового оснащення,

f – масив зовнішніх навантажень,

t – час.

Відволікаючись на даному етапі від виду оператора L , на першому етапі можна сконцентруватися на організації різноманітних досліджень напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення. Це важливо, оскільки при його проектуванні потрібно встановлювати залежності характеристик h_s НДС від варійованих проектно-технологічних параметрів p_k :

$$h = h(p, u, \boldsymbol{\sigma}), \quad (3.2)$$

де h – масив h_s ,

p – масив p_k ,

$u, \boldsymbol{\sigma}$ – розв'язки (3.1) при тому чи іншому наборі параметрів.

Характеристики h_s – це, наприклад, значення максимальних еквівалентних напружень в елементах штампового оснащення можуть бути або обмежуваними, або оптимізованими.

Параметри p_k – це, зокрема, габаритні розміри і товщини елементів штампового оснащення або технологічні параметри – тобто різні величини, форми або розподіли. Саме механізм оперування з параметрами p_k є найбільш проблемним. Дійсно, не становить принципової складності механізм варіювання традиційних чисельних параметрів: геометричні розміри, фізико-механічні або механічні характеристики матеріалів, з яких виготовлені елементи штампового оснащення. У той же час набагато складніше йде справа у разі створення механізму варіювання, наприклад, геометричної форми досліджуваних об'єктів.

Для оперування з такими параметрами, які називаються узагальненими, найбільшою мірою адаптований метод узагальненого параметричного моделювання [41]. Відповідно до цього методу варіативність того чи іншого узагальненого параметра забезпечується шляхом спеціального алгоритму, який ставить у відповідність конкретному значенню параметра геометричну і технологічну або силову характеристику елементів штампного оснащення. Цей алгоритм у найбільш складних випадках є або важкоформалізуємим, або неформалізуємим, і тоді необхідно залучати досвід і оцінки експертів – конструкторів, технологів або дослідників. Однак, як тільки такий алгоритм створюється, всі традиційні операції з чисельними параметрами можуть бути поширені і на операції з узагальненими параметрами.

Природно, що універсальних способів створення згаданих вище алгоритмів, які служать "транслятором" для втілення проекції певного узагальненого параметра в тій чи іншій моделі, не існує. Але насправді, безумовно, вплив множини p_k на h_s об'єктивно існує. Таким чином, формально співвідношення (3.1) можна переписати, інтегрувавши у них і традиційні, і узагальнені параметри:

$$L(\mathbf{u}, \boldsymbol{\sigma}, p, f, t) = 0. \quad (3.3)$$

Співвідношення (3.3) встановлюють і функціональну, і параметричну залежність змінних стану від просторово-часових координат та множини параметрів

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{r}, t, p); \quad \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, t, p), \quad (3.4)$$

де \mathbf{r} – радіус-вектор точок простору, який займають елементи штампного оснащення.

Параметричні залежності, представлені формально співвідношеннями (3.4), як правило, ідентифікуються в ході аналізу результатів багатоваріантних розв'язань задачі (3.3) при варіюванні параметрів p .

Незважаючи на значний інтерес, що представляють залежності (3.4), у практиці проектних робіт ще більший інтерес – до розв'язання задачі синтезу, тобто визначення таких оптимальних параметрів p^* , які задовольняють деяким вимогам:

$$h(u, p^*) \in [h], \quad I(u, \sigma, p^*, h) \rightarrow \min. \quad (3.5)$$

Перше із співвідношень (3.5) фіксує обмеження на контрольовані характеристики елементів штампового оснащення (наприклад, максимальні еквівалентні напруження, прогини тощо), а друге формується тими чи іншими вимогами до конкретного штампу або групи (гами) штампів (маса, габарити, товщини, вартість тощо). При цьому параметри p^* раніше вбудовані у рівняння (3.3), яким задовольняють змінні стану u , σ .

Природно, що розв'язок задачі (3.5) потребує багаторазового розв'язання задач аналізу (3.3). Таким чином, базовою математичною моделлю і при розв'язанні задач синтезу є (3.3), а в ній основним компонентом – спосіб інтегрування узагальнених параметрів у цю модель або в її чисельну реалізацію.

У підсумку в підрозд. 3.2 запропоновано загальний підхід до розв'язання задач аналізу напружено-деформованого стану і синтезу проектно-технологічних рішень, які задовольняють заданій множині обмежень і критеріїв, що відрізняються від відомих алгоритмом інтегрування у неї різних параметрів, у тому числі – узагальнених.

3.3 Моделювання напружено-деформованого стану з урахуванням множинної контактної взаємодії елементів розділових штампів

Співвідношення для аналізу напружено-деформованого стану елементів розділових штампів, представлені у підрозд. 3.2, записані в загальному вигляді. У той же час для розв'язання задач для конкретних об'єктів необхід-

но їх розписати, врахувавши основну особливість – наявність множинного контакту на поверхнях сполучення елементів розділових штампів один з одним.

Співвідношення (3.1) в розгорненому вигляді є геометрично нелінійними залежностями "переміщення – деформації" [172]

$$\varepsilon_{ij} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{i,k} \cdot u_{k,i}), \quad (3.6)$$

рівняння рівноваги –

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0 \quad (3.7)$$

і узагальненим законом Гука

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (3.8)$$

де $*, i = \partial */ \partial x$ – похідна за координатою x_i ,

$\mathbf{r} = \{x_1, x_2, x_3\}^T$ – 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, з яких складаються досліджувані елементи,

F_i – компоненти об'ємного навантаження;

індекси $i, j, k, l = 1, 2, 3$ (при їх повторенні у вираженні діє правило підсумовування за цим індексам [173]).

Позначивши область, займану досліджуваним об'єктом, як об'єднання підобластей, займаних окремими деталями:

$$\Omega = \bigcup_s \Omega_s, \quad (3.9)$$

а їх границі – відповідно

$$S = \bigcup_s S_s, \quad (3.10)$$

можна сформувати крайову задачу для аналізу напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення. У областях Ω_s діє система алгебро-диференціальних рівнянь (3.6)–(3.8). На межі кожної області S_s діють крайові умови трьох типів:

– геометричні

$$u_i^{(s)} \Big|_{S_u} = \hat{u}_i; \quad (3.11)$$

– силові

$$\sigma_{ij}^{(s)} n_j \Big|_{S_\sigma} = \hat{\sigma}_i; \quad (3.12)$$

– контактні

$$\left(u_i^{(s)} n_i^{(s)} + u_k^{(g)} n_k^{(g)} \right) \Big|_{S_c} \leq \delta_{sg}. \quad (3.13)$$

Тут при позначенні частин границь

$$S_s = S_u^{(s)} \cup S_\sigma^{(s)} \cup S_c^{(s)}$$

опущені індекси приналежності до границі того чи іншого тіла s . При цьому \hat{u}_i , $\hat{\sigma}_i$ – задані переміщення і поверхневе навантаження, а $n_r^{(d)}$ – компоненти вектора нормалі до поверхні S_d .

Рівняння (3.11), (3.12) є класичними граничними умовами типу Діріхле або Неймана [172]. У той же час співвідношення (3.13) принципово від них відрізняються: вони є нерівностями, а не рівностями, і визначають умови непроникнення тіла s в тіло g , причому початковий зазор за нормаллями між цими тілами – δ_{sg} . Крім того, важливою обставиною є те, що зазвичай частини поверхні S_u і S_σ є відомими і заданими, а, на відміну від них, S_c – невідома і є шукана. Шуканим при цьому є і контактний тиск

$$q = q(r) \Big|_{S_c} \geq 0, \quad (3.14)$$

який визначає нормальне і (за наявності тертя) дотичне напруження на пове-

рхні S_c .

Співвідношення на границі (3.11)–(3.14) формують крайові умови, які доповнюють рівняння (3.6)–(3.8) і формують разом з ними крайову задачу. Вона нелінійна не тільки в силу нелінійності (3.6), але, в першу чергу, – через наявність нелінійних співвідношень (3.13).

Як зазначалося в розд. 1, для розв'язання контактної задачі застосовуються різні методи і моделі. У той же час для задач, що виникають при аналізі контактної взаємодії елементів штампового оснащення, є низка особливостей. Головна з них – множинний контакт деталей штампів, причому в основному – на поверхнях узгодженої форми. Більш того, враховуючи варіативність Ω_s , S_c , на етапі проектних розробок змінюються і ділянки локалізації S_c , також варіативними можуть бути і технологічні чинники (і при виготовленні штампів, і при здійсненні технологічних операцій штампування за їх допомогою): властивості матеріалів кріплення колонок і втулок в штампах, технологічні зазори між ріжучими крайками матриць, пуансон-матриць і пуансонів, з одного боку, і матеріалом, що штампується, – з іншого, товщина і механічні властивості штампуємого матеріалу тощо). Усі ці узагальнені параметри включаються у складну математичну модель напружено-деформованого стану з урахуванням контактної взаємодії, а умови (3.13), що реалізуються на поверхнях контактуючих пар, вносять додаткову складність у створювану комплексну математичну модель.

Утворювана система розв'язувальних співвідношень, як одним з найбільш ефективних методів, може бути задоволена із застосуванням теорії варіаційних нерівностей.

Відповідно до цього методу вводиться в розгляд підмножина пробних функцій K :

$$K \in \left\{ v^{(s)} : \left(v_i^{(s)} n_i^{(s)} + v_k^{(g)} n_k^{(g)} \right) \Big|_{S_{sg}} \leq \delta_{sg} \right\}, \quad (3.15)$$

а також функціонал повної внутрішньої енергії:

$$I(v) = \frac{1}{2} \sum_s \int_{(\Omega_s)} \sigma_{ij}^{(s)} \cdot \varepsilon_{ij}^{(s)} d\Omega - \sum_s \int_{(S_s^{(s)})} \sigma_i^{\wedge} u_i dS - \sum_s \int_{(S_C)} \sigma_{sj} \cdot v_j \cdot u_s dS. \quad (3.16)$$

Перший доданок у (3.16) визначає квадратичну форму $a(v, v)$, породжувану білінейними формами

$$a(u, v) = \frac{1}{2} \int_{(\Omega_s)} \sigma_{ij}^{(s)}(u) \varepsilon_{ij}^{(s)}(v) d\Omega, \quad (3.17)$$

а останній – лінійними

$$b_S(v) = \int_{(S_C)} \sigma_{ij}^{(s)} v_i^{(s)} u_i^{(s)} dS. \quad (3.18)$$

Тоді, відповідно до [174], всю початково-крайову задачу можна звести до мінімізації функціоналу $I(u)$ на множині K (див. (3.15), (3.16)):

$$\mathbf{u} : I(\mathbf{u}) \rightarrow \min, \mathbf{u} \in K. \quad (3.19)$$

Далі зі співвідношень (3.6), (3.7) за знайденим з (3.19) розподілами $u(r)$ знаходяться поля $\varepsilon(u)$, $\sigma(\varepsilon)$, а, відповідно, стає можливим здійснити повну оцінку міцності та жорсткості елементів штампного оснащення. При цьому, в ході розв'язання отримуємо і область контактної взаємодії S_c , і розподіл контактної тиску q . Цим самим розв'язується сформульована зв'язана задача аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням контактної взаємодії елементів штампного оснащення. Особливістю запропонованого підходу є індиферентність відносно наявності множинних (а не звичайних одиничних) областей контактної взаємодії. Крім того, не втрачається запропонована і описана у роботі вище (див. підрозд. 3.2) методологія параметризації, що надає найширші можливості при розв'язанні задач синтезу проектно-технологічних рішень при розробці елементів штампного оснащення.

Як зауваження можна відзначити, що при пошуці мінімуму функціона-

лу (3.19) на опуклій множині (3.15) можливе застосування методів штрафу, множників Лагранжа, спряжених градієнтів тощо [175, 176]. У поєднанні з методом дискретизації ці постановки застосовані у підрозд. 3.4.

Ще одним зауваженням служить посил про присутність часової координати у розв'язувальних рівняннях (3.1). Природно, що у повній динамічній постановці (тобто при врахуванні сил інерції в розв'язувальних рівняннях (3.7)) задача визначення напружено-деформованого стану з урахуванням контактної взаємодії призводить у загальному випадку до початково-крайової задачі. Однак, як показують експериментальні [30] та чисельні дослідження, власні частоти коливань елементів штампного оснащення, наприклад, базових плит, набагато вищі частоти прикладання сили штампування (див. підрозд. 4.1).

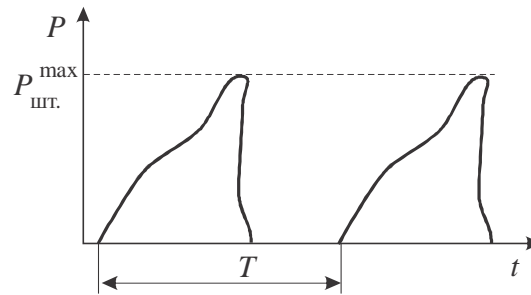


Рисунок 3.1 – Циклічне прикладання сили штампування до елементів штампного оснащення

У зв'язку з цим динамічними ефектами, що виникають при циклічному прикладанні сили штампування (рис. 3.1), які діють з частотою $\nu = 1/T$ і кратними їй, можна знехтувати для серійних кривошипних штампів. Це пояснюється тим, що основна частота збудження $\nu \ll \nu_1$ (ν_1 – нижня частота власних коливань елементів штампного оснащення), а для кратних, більш високих гармонік у розкладанні $P_{шт.}(t)$ в ряд Фур'є:

$$P_{шт.} = Q_0 + \sum_k Q_i^{(1)} \sin(2\pi\nu kt) + \sum_k Q_i^{(2)} \cos(2\pi\nu kt), \quad (3.20)$$

з ростом кратності k різко збільшуються сили демпфування, які зменшують

амплітуди збурюваних коливальних процесів.

Таким чином, без урахування динамічних ефектів напружено-деформований стан досліджуваних елементів штампного оснащення можна розглядати як квазістатичний. Залежність же компонент НДС від часу t можна трансформувати у залежність від параметра $P_{шт.}$, який змінюється у межах (див. рис. 3.1):

$$0 \leq P_{шт.} \leq P_{шт.}^{\max}. \quad (3.21)$$

Природно, що якщо ввести безрозмірний параметр $\tau = P_{шт.} / P_{шт.}^{\max}$, то для лінійно пружних задач залежність компонент напружено-деформованого стану від τ є лінійною (від нуля при $\tau = 0$ до максимуму при $\tau = 1$). Однак по-суті задача аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням контактної взаємодії є, як зазначалося вище, нелінійною. Таким чином, доцільно дослідити залежність напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення від параметру τ , маючи на увазі, що максимальне значення сили штампування [35]

$$P_{шт.}^{\max} = k_3 \cdot L \cdot h \cdot \sigma_{зр.}, \quad (3.22)$$

де $k_3 = 1,1 \div 1,3$ – коефіцієнт затуплення ріжучих кромek пуансонів, матриць і пуансон-матриць,

L, h – периметр і товщина деталі, яку вирубують,

$\sigma_{зр.}$ – напруження зрізу (механічна характеристика матеріалу, що штампується).

Для переналагоджуваних штампів, призначених для виготовлення не однієї конкретної деталі, а їх гама, описаний вище підхід модифікується. Дійсно, у цьому випадку діапазон зміни сили штампування обмежується зверху величиною

$$P_{шт.}^{\max \max} = P_{шт.}^{\max} (L_{\max}, h_{\max}, \sigma_{ср.}^{\max}), \quad (3.23)$$

де максимум визначається за найбільшою товщиною, периметром і напруженням зрізу для вибраного типорозміру переналагоджуваного штампа (див. розд. 1). Відповідно, сенс параметра змінюється: він визначає протікання процесу навантаження не тільки при навантаженні елементів штампового оснащення при штампуванні конкретної деталі, а цілої її гами (рис. 3.2). Таким чином, отримуємо множину розв'язків при варіюванні $0 < \tau \leq 1$.

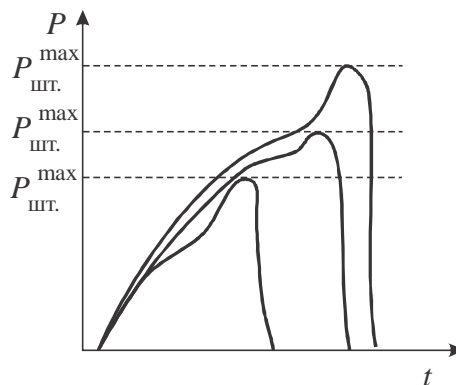


Рисунок 3.2 – Сили штампування для гами деталей

Незважаючи на прийняте припущення про несуттєвий вплив на напружено-деформований стан елементів штампового оснащення інерційних сил, цю тезу необхідно перевірити. Якщо взяти окремий елемент штампа, то для нього можна на основі створюваної скінченно-елементної моделі записати розв'язувальну систему рівнянь вільних коливань без тертя

$$M\ddot{X} + CX = 0, \quad (3.24)$$

де M, C – матриця мас і жорсткості [39];

X – вектор вузлових змінних, що описує стан досліджуваного об'єкта.

Умова здійснення досліджуваним елементом штампового оснащення головного руху –

$$X = \lambda \sin \omega t, \quad (3.25)$$

де λ, ω – власна форма і частота коливань відповідно.

При підстановці у (3.24) це дає систему рівнянь для визначення влас-

них форм коливань:

$$(C - \omega^2 M) \lambda = 0. \quad (3.26)$$

Тут ω – власні частоти, що задовольняють частотному рівнянню

$$\text{Det}(C - \omega^2 M) = 0, \quad (3.27)$$

з якого визначається цілий спектр власних частот коливань

$$\omega_i = 2\pi\nu_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3.28)$$

де N – кількість ступенів свободи скінченно-елементного ансамблю, який моделює той чи інший елемент штампового оснащення (в (3.8) ω_i вимірюється у с^{-1} , $\nu_i = 1/T_i$ – у Гц).

Розв'язок задачі (3.28) надає можливість оцінити значимість динамічних ефектів для напружено-деформованого стану того чи іншого ЕШО шляхом зіставлення нижньої межі спектру власних частот ν_1 коливань з частотою роботи преса:

$$\nu = 1/T \ll \nu_1 = 1/T_1. \quad (3.29)$$

Повну оцінку легко здійснити, маючи у розпорядженні спектр власних частот коливань ν_i , а його стандартним способом знаходять при використанні методу скінченних елементів. Крім того, представляє також інтерес набір власних форм коливань, що отримуються з (3.26) після розв'язання (3.27). Ці форми λ_i визначають зони елементів штампового оснащення, найбільш або найменш чутливі до збудження на частоті, близькій до ν_i .

І власні форми коливань, і власні частоти коливань часто залежать від того, який тип моделі використовується для скінченно-елементного подання елементів штампового оснащення. Раніше часто використовували BEAM та

Shell елементи, хоча і робили задачу менш громіздкою, проте не давали повної картини власних коливань. У цьому зв'язку в роботі, крім цих моделей, використані і скінченно-елементні моделі з елементами типу Solid, тобто істотно тривимірними.

Застосовуючи запропонований алгоритм, далі наведена оцінка власних частот і власних форм коливань елементів штампного оснащення і здійснені обґрунтовані висновки про можливість розгляду напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення у квазістатичній постановці.

Природно, що задекларовані наслідки необхідно перевірити на прикладах розв'язання конкретних задач.

Ще одним частинним, але дуже важливим питанням є встановлення тенденції зміни розв'язку контактної задачі при зростанні сили штампування $P_{шт}$. Як уже зазначалося вище, на величину $P_{шт}$ впливає товщина, властивості матеріалу, що штампується, периметр контуру, який вирубався (пробирається). Відволікаючись від виду цих залежностей, розглянемо один їх зріз: як впливає деякий коефіцієнт збільшення $P_{шт}$ на одержуваний розв'язок. Для цього, як і вище, використовуємо наступний алгоритм:

- нехай P_0 – деяке номінальне значення $P_{шт}$;
- нехай, слідуючи теорії варіаційних нерівностей, мінімізується квадратичний функціонал, який має після дискретизації за МСЕ вигляд:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i,j} C_{ij} u_i^0 u_j^0 - P_0 \sum_i \rho_i u_i^0 = a(u^0, u^0) - b(u_i^0); \quad (3.30)$$

- нехай, враховуючи контактування елементів штампного оснащення за узгодженими поверхнями (площинами), умови непроникнення мають вигляд:

$$u_r - u_s = 0, r, s \in J_c; \quad (3.31)$$

$$u_r - u_s > 0, r, s \notin J_c, \quad (3.32)$$

де J_c – множина контактуючих пар вузлів;

C_{ij} – компоненти матриці жорсткості СЕМ елементів штампного оснащення;

P_0, ρ_0 – масив вузлових навантажень на цю модель;

u_i^0 – масив вузлових змінних, відповідних розв'язку задачі

$$I(u_i^0) \rightarrow \min$$

за умов (3.31), (3.32).

Подаючи u_i^τ як розв'язок аналогічної задачі для

$$P_{шт} = \tau P_0,$$

помічаємо, що

$$I(u_i^\tau) = \tau^2 a(u^0, u^0) - \tau b(u^0). \quad (3.33)$$

Тоді в перерізах функціоналу, які не містять обмежень (3.31), отримуємо умови мінімуму

$$\frac{\partial I}{\partial u_k} = 0, \quad (3.34)$$

а, значить, $u_k^\tau = \tau u_k^0$.

У перерізах, де справедливі обмеження (3.31), розв'язок $u_e^\tau = \tau u_e^0$ внаслідок автоматичного виконання (3.31) при множенні на τ всіх доданків, а також при виконанні умови проєкції мінімуму I в напрямку $u_r = u_s$ на обмеження, що збігаються з (3.31).

Графічно це можна подати у вигляді, наведеному на рис. 3.3. На рисунку введені наступні позначення: O_0 – точка безумовного мінімуму при $P_{шт} = P_0$; T_0 – точка умовного мінімуму при $P_{шт} = P_0$; O_τ – точка безумовного мінімуму при $P_{шт} = \tau P_0$; T_τ – точка умовного мінімуму при $P_{шт} = \tau P_0$.

Видно, що для випадків, коли відшукується і безумовний мінімум, і

умовний, одержувані розв'язки пов'язані умовами пропорційності:

$$\frac{|O_r 0|}{|O_0 0|} = \tau; \quad \frac{|T_r 0|}{|T_0 0|} = \tau. \quad (3.35)$$

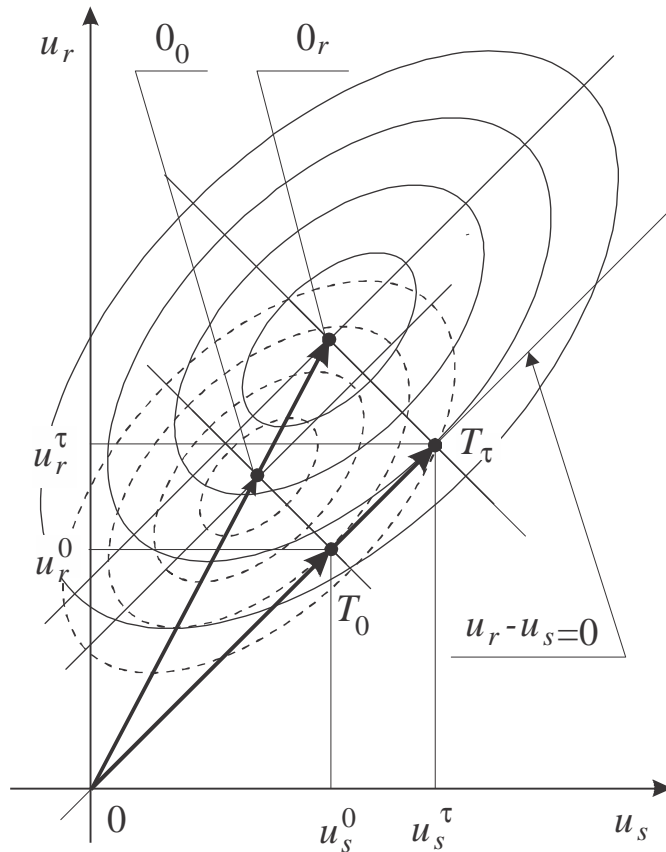


Рисунок 3.3 – Лінії рівня функції I в перерізі $u_r - u_s$

Крім того, пари точок (u_r^τ, u_s^τ) або належать прямій $u_r - u_s = 0$, або їй не належать, і їх статус не змінюється при зміні $P_{шт}$.

Таким чином, звідси маємо два наслідки:

1) якщо є для випадку контакту з узгодженими поверхнями деякий розв'язок задачі про визначення напружено-деформованого стану, то при іншій силі штампування всі компоненти розв'язку збільшуються пропорційно $P_{шт}$;

2) зміни множини J_c при $P_{шт} = \text{var}$ не відбувається, тобто зона контактної взаємодії зберігається, а контактний тиск лінійно зростає.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що у підрозділі сформульовано удосконалену математичну модель напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення з урахуванням контактної взаємодії, яка враховує, на відміну від традиційного одиничного, *множинний* контакт у сполученні ЕШО і варіативність сили штампування, що діють на переналагоджувані штампи при вирубці-пробиванні деталей різної товщини, розмірів і з різних матеріалів.

3.4 Чисельна реалізація розробленої математичної моделі

Натепер розв'язання задач про визначення напружено-деформованого стану тіл складної форми у більшості випадків здійснюється чисельно, як правило, методом скінченних елементів. Цей метод фактично став стандартним інструментом досліджень. У зв'язку з цим одиничний розрахунок окремо взятої конкретної конструкції не становить принципових труднощів. Однак ситуація може бути істотно ускладнена, як, зокрема, при дослідженні напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення. Основними чинниками, які ускладнюють проведення цих досліджень, є, по-перше, складність і варіативність конструкції штампів, а по-друге, наявність множинних контактів. Перший з чинників обумовлений початковою невизначеністю конструктивних і технологічних параметрів, форм і розмірів елементів штампового оснащення, що може призводити у разі застосування тривіальних засобів параметризації до колізій, тобто порушення узгодженості, цілісності та функціональності штампа при варіюванні параметрів у всьому діапазоні їх зміни. Другий чинник створює проблемну ситуацію при надмірному ускладненні конструкції з точки зору введення множинних контактних пар.

Для вирішення конфліктних ситуацій, породжуваних першим чинником, необхідно створення спеціальних процедур. Вони призначені для забезпечення

узгодженої зміни геометричної моделі елементів штампового оснащення для аналізу наявності колізій при тому чи іншому поєднанні варіюваних параметрів. Проблеми, викликані другим із чинників, вирішуються спеціальною процедурою, яка шляхом варіювання умов на поверхнях контакту дає можливість зменшити надмірну громіздкість скінченно-елементної моделі.

На рис. 3.4 представлена загальна структура спеціалізованого програмно-модельного комплексу для дослідження напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення з урахуванням контактної взаємодії.

Цей СПМК поєднує поглиблені можливості універсальних систем (CAD – Creo, SolidWork, Catia, CAE-систем – ANSYS, Femap, Abaqus тощо) та спеціальних програмних засобів. На етапах I, III–V моделюються специфічні особливості елементів штампового оснащення, здійснюється генерація і цілеспрямоване варіювання їх параметрів, а етапи II, IV відповідають за створення моделей елементів штампового оснащення і розрахунок їхнього напружено-деформованого стану.

Запропонована блочно-модульна структура чисельних досліджень є гнучкою і «переналагоджуваною» на той чи інший тип штампа. При цьому важливо, що процес розрахункових досліджень починається не «з чистого аркуша», а із запиту у створювану базу даних (БД) VII на предмет наявності в ній результатів розрахунку, які відповідають поточному варіанту. Завершується ж кожен цикл розрахунків поповненням БД.

Таким чином, у ході цих досліджень розв'язуються лише задачі, які раніше не були розв'язані, а база даних постійно поповнюється і забезпечує оперативний доступ до інформації, вже до даного моменту в ній накопиченої, у режимі «запит – відповідь» (тобто діалогу з експертом або проектантом). Ще однією особливістю цього спеціалізованого програмно-модельного комплексу є його відкритість і потенційна можливість вбудовування у спеціалізовані бази знань та експертні системи.

Таким чином, можна зробити висновок, що запропонована комплексна

математична модель знайшла свою реалізацію у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу, який не лише не звужує її можливості, але й створює додаткові.

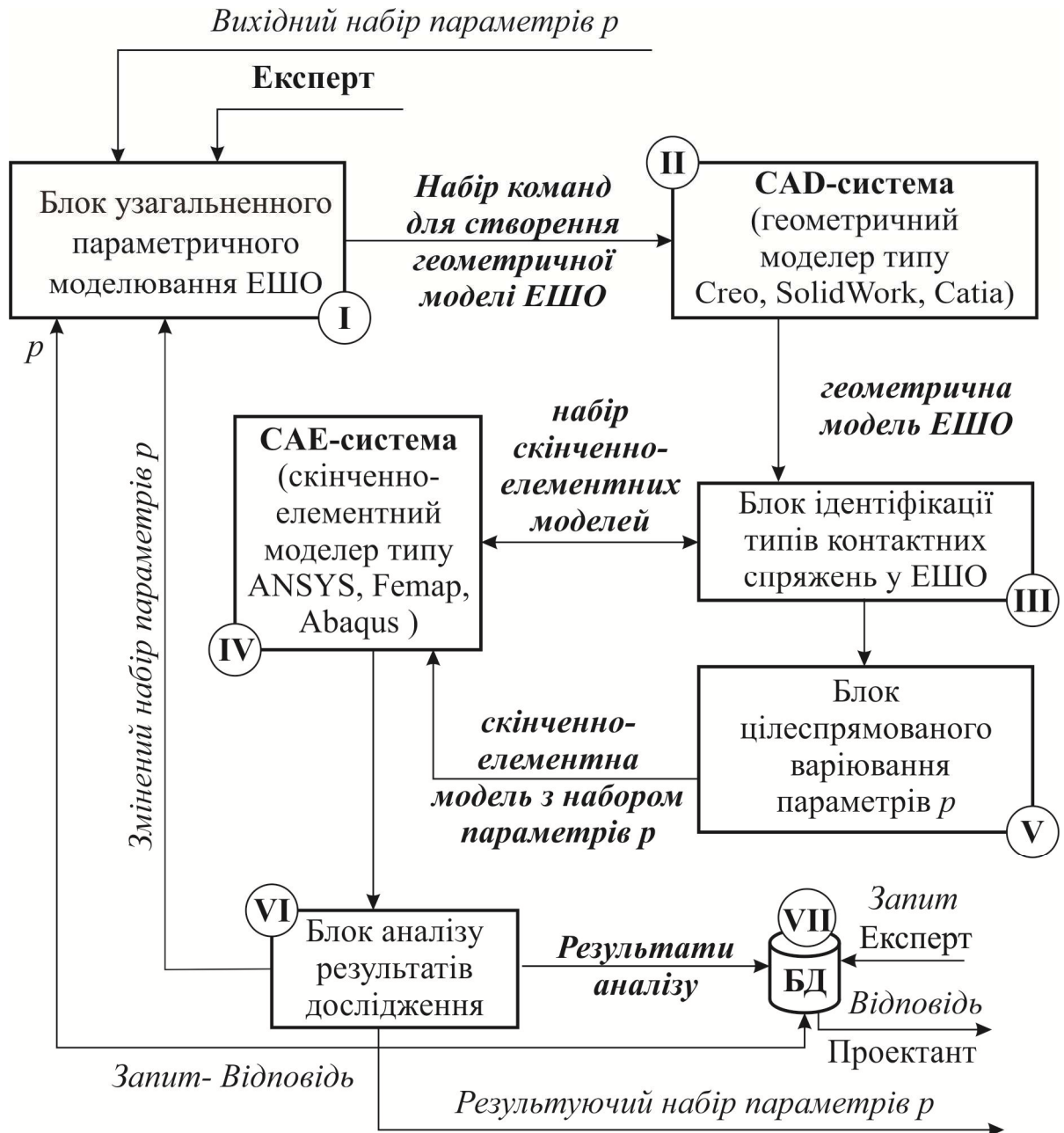


Рисунок 3.4 – Структура спеціалізованого програмно-модельного комплексу для дослідження напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення з урахуванням множинної контактної взаємодії

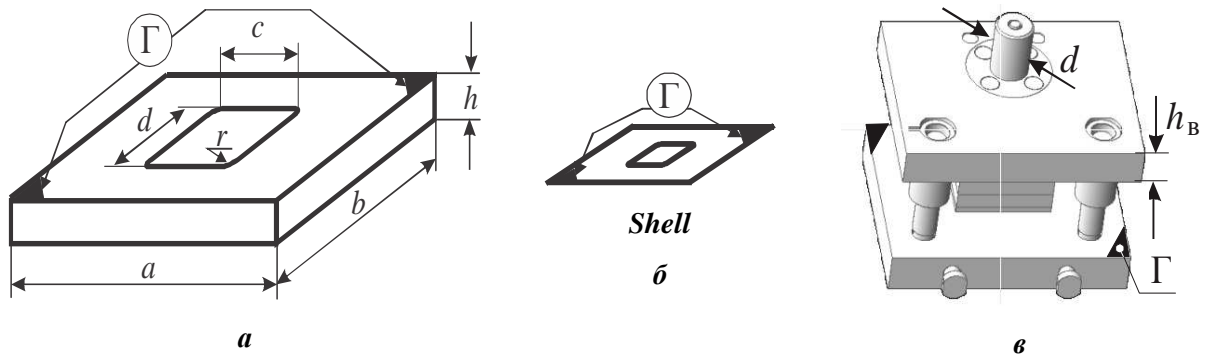
Із застосуванням розробленого спеціалізованого програмно-модельного комплексу розв'язано низку прикладних задач дослідження напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення. Як вхідні дані можуть виступати набір проектно-технологічних параметрів, як вихідні – міцнісні та жорсткісні характеристики, які служать основою для прийняття технічних рішень на етапі розробки штампового оснащення.

3.5 Динамічні характеристики елементів розділових штампів

Як зазначалося раніше в підрозд. 3.2, динамічні ефекти неминуче супроводжують процес штампування, оскільки сама природа цього технологічного процесу передбачає розвиток силового впливу у часі на листовий метал шляхом, наприклад, поступального руху повзуна преса, що передається на рухомі частини штампа, від початкових етапів індентування аж до остаточного поділу матеріалу, що штампується. Однак мова йде про ступінь впливу динамічних ефектів на напружено-деформований стан в елементах розділових штампів. У роботі [30] (див. розд. 1) зроблено висновок, який базується на експериментальному визначенні спектра власних частот коливань, що впливом динамічних ефектів на НДС базових плит можна знехтувати через більш низький рівень частот збуджень порівняно із власними частотами коливань базової плити. У той же час ця аргументація відноситься тільки до конкретних варіантів ЕШО, дослідженим на предмет визначення спектру ВЧК. Для більш об'єктивної аргументації необхідно здійснити багатоваріантні дослідження реакції спектру власних частот коливань на варіювання проектно-технологічних параметрів елементів штампового оснащення. У зв'язку з цим в роботі було досліджено спектр власних коливань базових плит та блоків при варіюванні деяких параметрів за допомогою МСЕ.

На рис. 3.5 подані три варіанти розрахункових моделей досліджуваної

конструкції. Рис. 3.5, *a* відповідає окремо взятій нижній базовій плиті у вигляді паралелепіпеда з розмірами у плані $a \times b$ і товщиною h . У плиті виконане провальне вікно розмірами $c \times d$ з радіусом заокруглення r . На рис. 3.5, *б* – та ж модель, але у вигляді тонкостінної конструкції. Блок у вигляді нижньої і верхньої базових плит та діагонально розташованих напрямних колонок наведено на рис. 3.5, *в*. Закріплення здійснено за допомогою двох діагонально розташованих прихоплювачів на області Γ . У табл. 3.1 наведено варіанти зміни представлених на рис. 3.5 параметрів. Матеріал плити – сталь 40Х.



a – нижня базова плита; *б* – пластинчаста модель базової плити;
в – блок розділового штампа

Рисунок 3.5 – Варіанти розрахункових схем елементів штампового оснащення

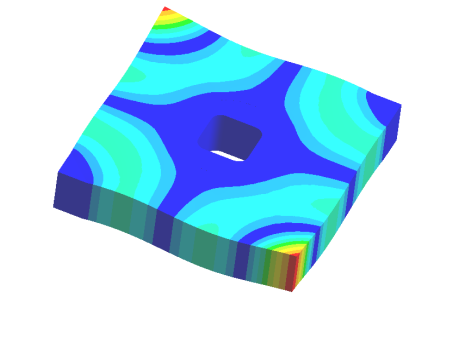
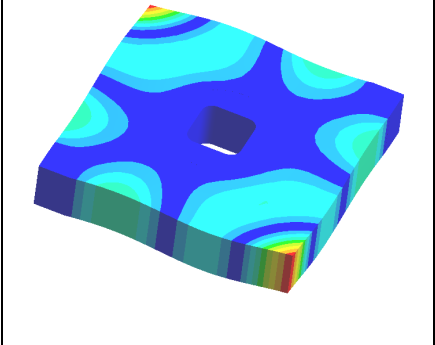
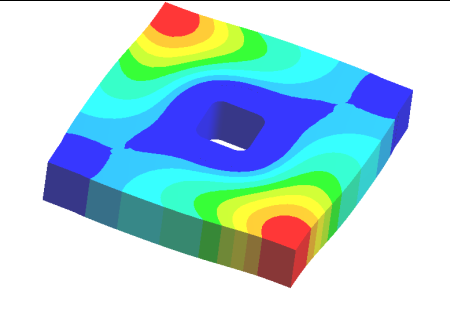
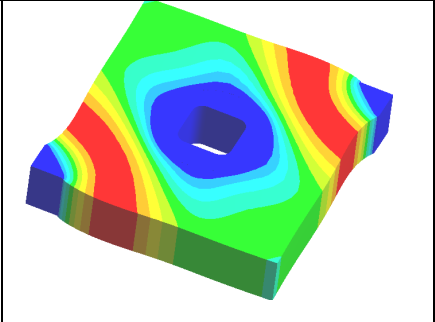
Таблиця 3.1 – Варіанти зміни конструктивних параметрів розділових штампів

№ п/п	Параметри	Мінімальне значення, мм	Максимальне значення, мм	Примітка
1.	Діаметр провального отвору D	0	$0,8a$	0 – без провального вікна
2.	Довжина a			$b \geq a$
3.	Ширина b			
4.	Довжина вікна c	0	$0,5a$	0 – без провального вікна
5.	Ширина вікна d	0	$0,5b$	
6.	Товщина плити h	$0,05a$	$0,5a$	

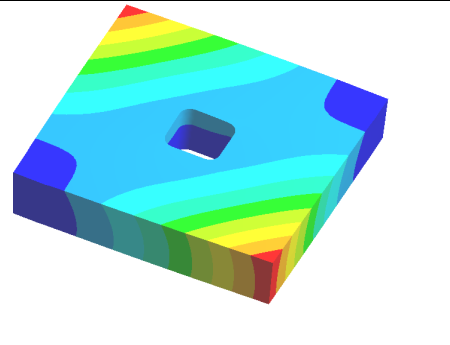
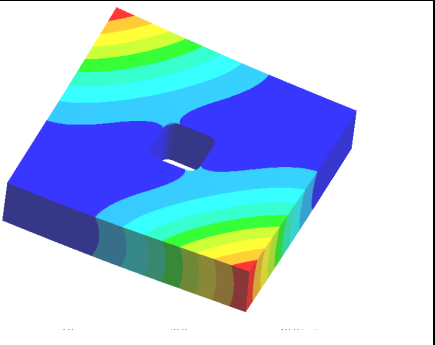
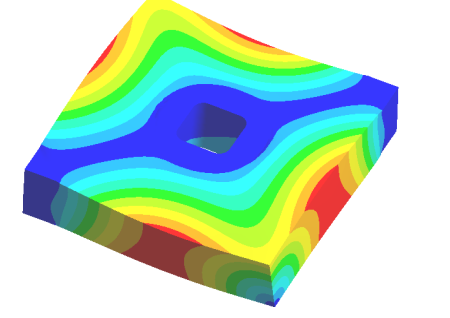
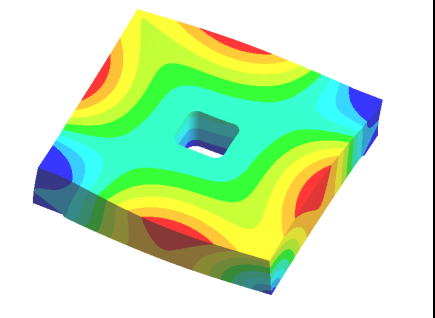
Таблиця 3.2 – Власні форми коливань нижньої базової плити штампа (Shell-постановка)

Частота, кГц	Власні форми коливань	Частота, кГц	Власні форми коливань
3,34 27,489 Max 24,435 21,361 18,326 15,272 12,217 9,1631 6,1087 3,0544 0 Min		5,77 17,385 Max 15,454 13,522 11,59 9,6585 7,7268 5,7951 3,8634 1,9317 0 Min	
6,19 17,678 Max 15,714 13,75 11,786 9,8213 7,857 5,8928 3,9285 1,9643 0 Min		6,61 20,13 Max 17,893 15,657 13,42 11,183 8,9467 6,71 4,4733 2,2367 0 Min	
7,38 21,837 Max 19,41 16,984 14,558 12,132 9,7052 7,2789 4,8526 2,4263 0 Min		7,58 18,96 Max 16,853 14,747 12,64 10,533 8,4267 6,3201 4,2134 2,1067 0 Min	
7,89 17,106 Max 15,206 13,305 11,404 9,5036 7,6029 5,7022 3,8014 1,9007 0 Min		10,16 14,699 Max 13,065 11,432 9,7991 8,1659 6,5327 4,8995 3,2664 1,6332 0 Min	
10,79 11,264 Max 10,013 8,7611 7,5095 6,2579 5,0063 3,7547 2,5032 1,2516 0 Min		10,86 18,09 Max 16,08 14,07 12,06 10,05 8,04 6,03 4,02 2,01 0 Min	

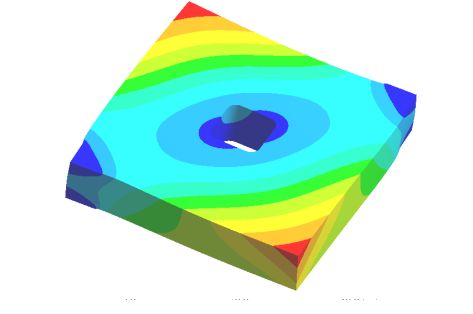
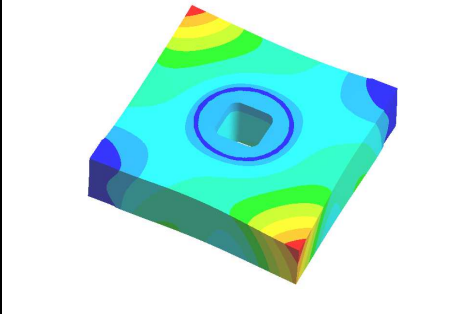
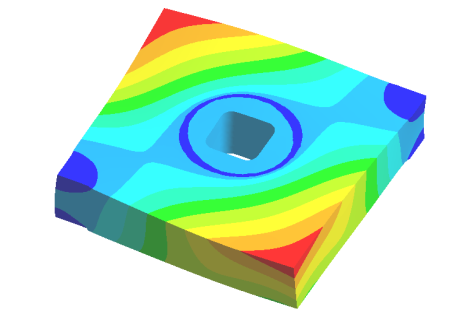
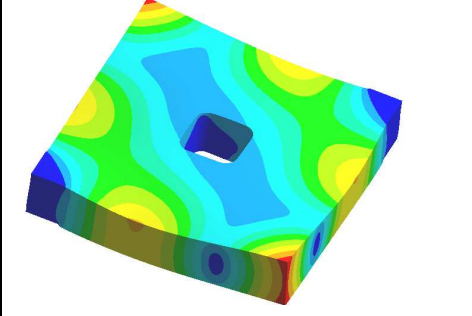
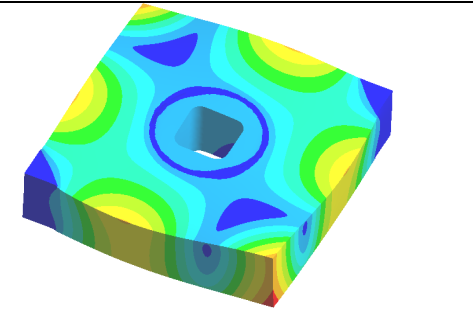
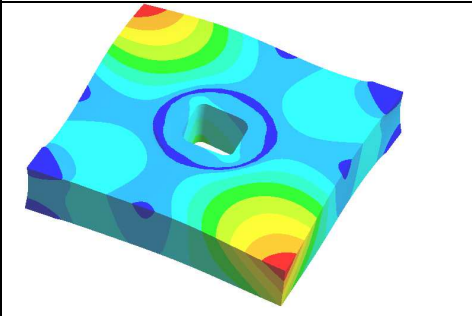
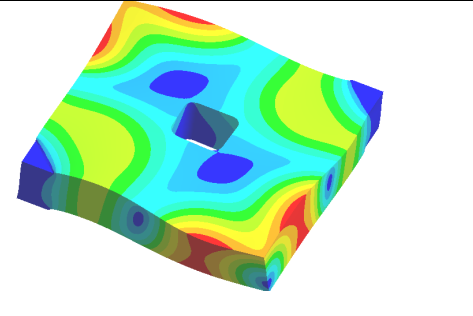
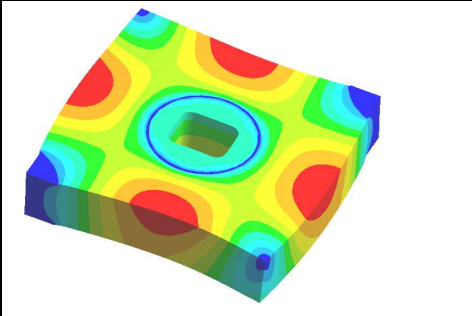
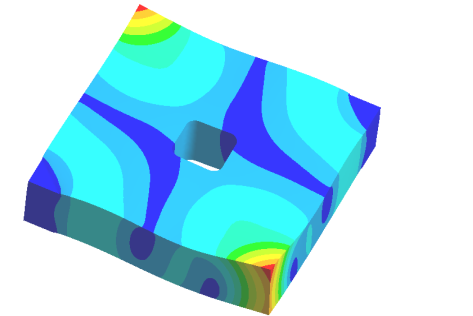
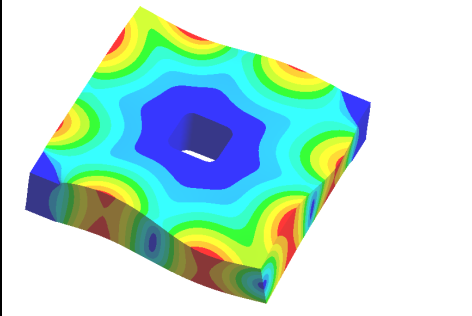
Закінчення табл. 3.2

Частота, кГц	Власні форми коливань	Частота, кГц	Власні форми коливань
11,37		12,12	
12,39		13,28	

Таблиця 3.3 – Власні форми коливань нижньої базової плити штампа (Solid-постановка)

Частота, кГц	Власні форми коливань	Частота, кГц	Власні форми коливань
2,09		2,61	
4,42		4,58	

Закінчення табл. 3.3

Частота, кГц	Власні форми коливань	Частота, кГц	Власні форми коливань
4,64		5,58	
5,84		6,52	
6,82		8,79	
9,0		9,19	
10,24		10,49	

Результати розрахунків спектрів власних частот коливань базових плит зведені у відповідній базі даних. Природно, що діапазон зміни варійованих параметрів може бути для реальних штампів ширшим, ніж у наведених даних. Згідно з розробленим у дисертації підходом, це не є перешкодою, оскільки цей діапазон можна розширювати, так само як і проваріювати досліджувану конструкцію. При цьому можна керуватися тим, що при накладенні додаткових зв'язків (додаткові прихоплювачі, колонки, пакети), як правило, власні частоти коливань системи підвищуються. Таким чином, у цьому випадку отримуємо нижню оцінку спектру ВЧК.

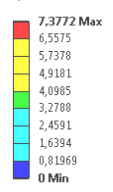
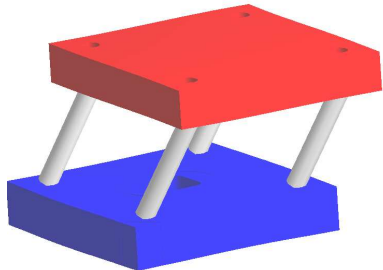
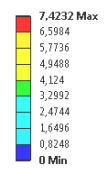
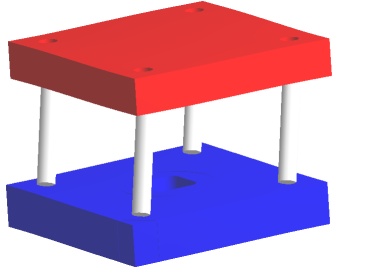
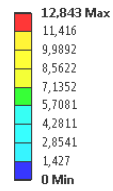
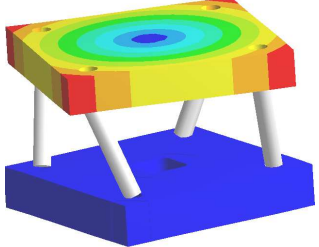
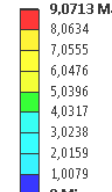
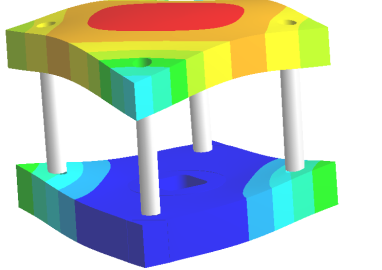
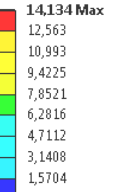
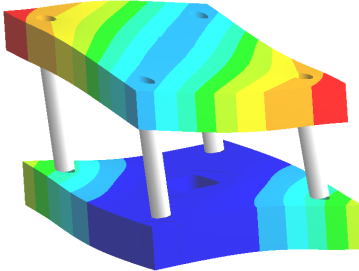
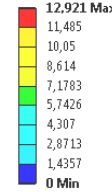
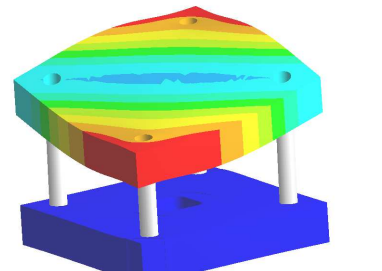
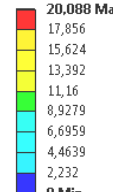
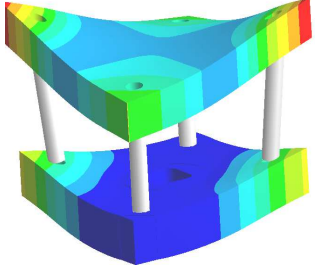
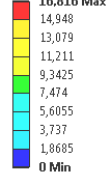
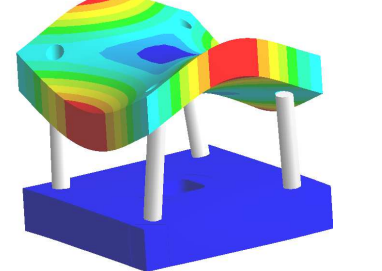
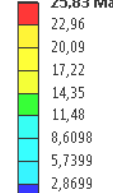
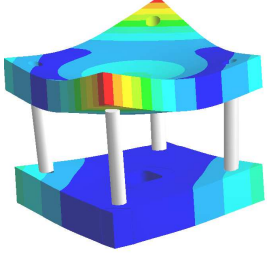
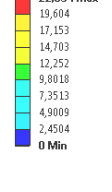
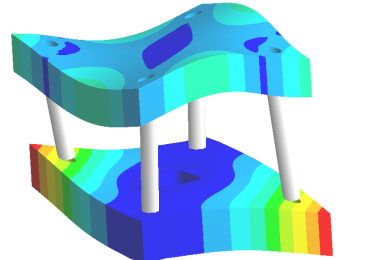
При цьому зі створеної бази даних можна вибрати будь-який зріз і отримати залежності власних частот коливань $\nu_i = \nu_i(p)$, де p – масив варійованих параметрів. Зокрема, для блоків розмірами 240x240 (мм), розміри провального отвори в нижній плиті $\varnothing 50$ мм, товщина нижньої базової плити $h = 40$ мм, відстань між напрямними колонками $\varnothing 20$ мм – 180 мм, діаметр провального отвору у підштамповій плиті штампа – $\varnothing 100$ мм, наведені в табл. 3.2 власні форми коливань базових плит в Shell-постановці, а в табл. 3.3 – те ж, але для базових плит, розглянутих у просторових конструктивах.

Видно, що спостерігається істотна різниця в отриманих результатах: нижня межа спектру на $3D$ моделі в 1,6 рази нижче, ніж на $2D$, хоча і залишається досить високою (більш 2 кГц, що на кілька порядків вище, ніж частота прикладання сили штампування). У зв'язку з цим пропонується у подальшому використовувати повну просторову постановку, оскільки на теперішній час обчислювальні потужності комп'ютерів надають можливість розв'язувати задачу аналізу спектру ВЧК досить оперативно.

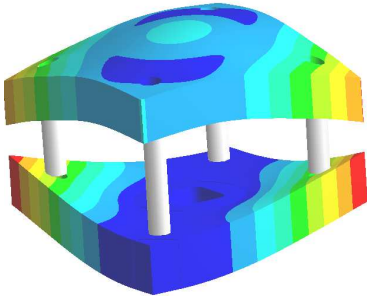
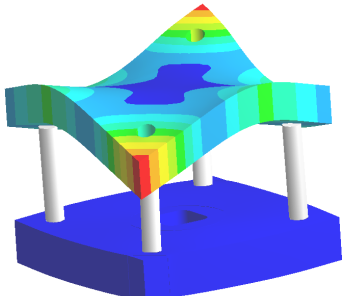
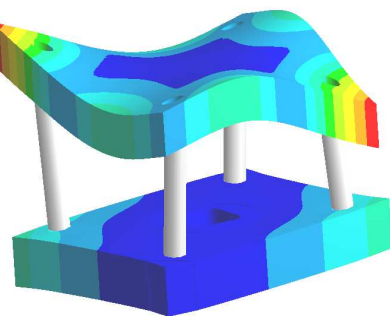
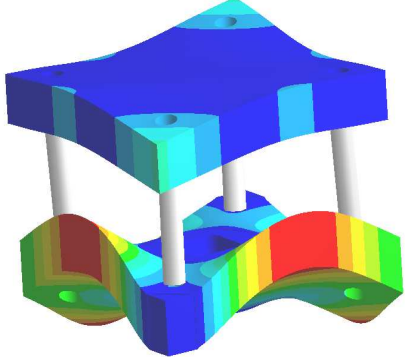
У табл. 3.4 представлені власні форми коливань окремо взятої нижньої базової плити у сполученні з колонками і верхньою базовою плитою (Shell-постановка), у табл. 3.5 – те ж, але для Solid-постановки. Крім того, на рис. 3.6–3.9 представлені спектри власних частот коливань для базових плит і блоків. Видно, що ВЧК всього блоку, які відповідають аналогічним форм ко-

ливань для окремо взятої плити, підвищуються. Відповідно, за нижню межу спектру ВЧК можна обирати результати для окремо розглянутих плит.

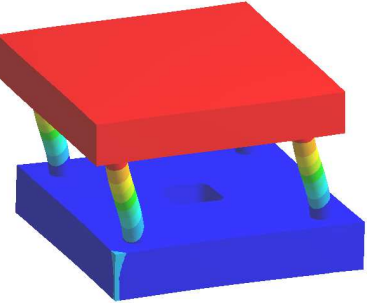
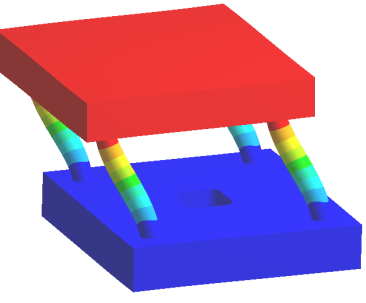
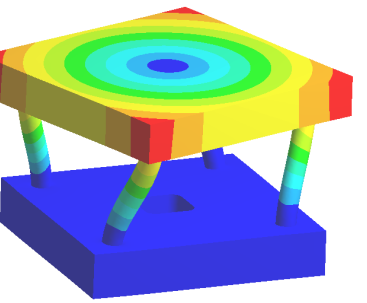
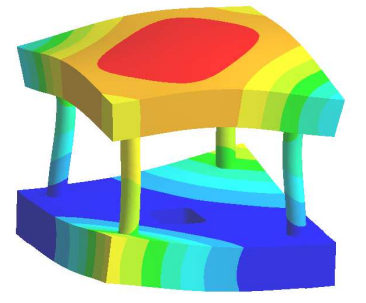
Таблиця 3.4 – Власні форми коливань блока штамп (Shell-конструктиви)

Частота, кГц	Власні форми коливань	Частота, кГц	Власні форми коливань
0,29 		0,3 	
0,4 		1,36 	
1,67 		2,13 	
3,07 		3,14 	
4,16 		4,24 	

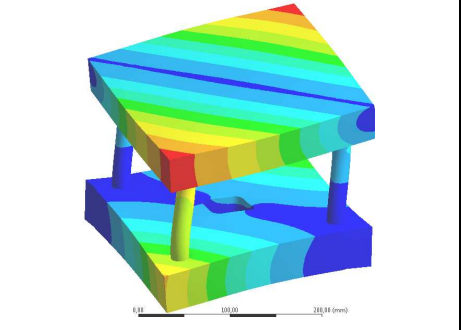
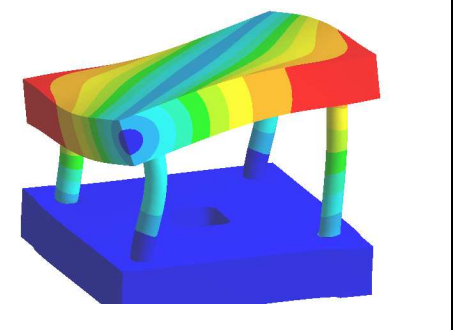
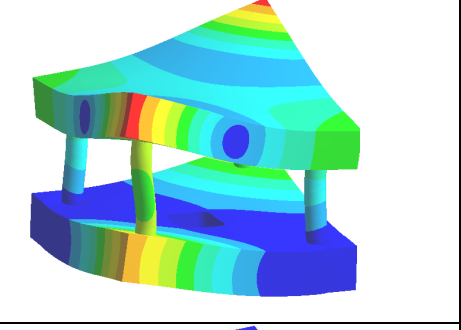
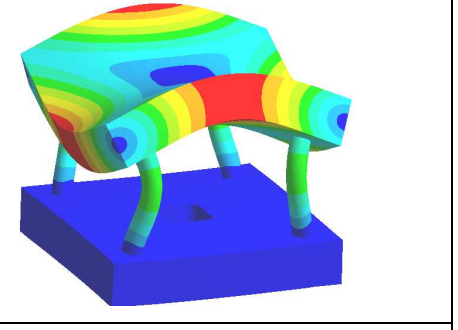
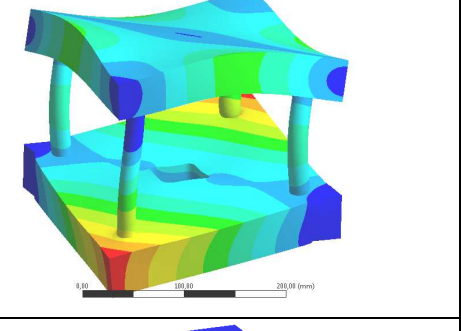
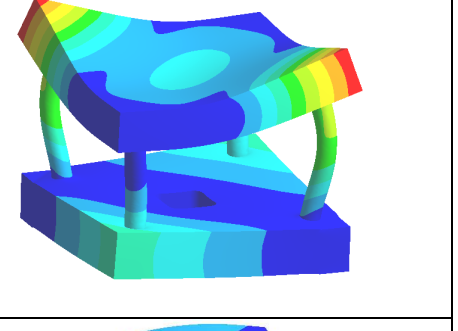
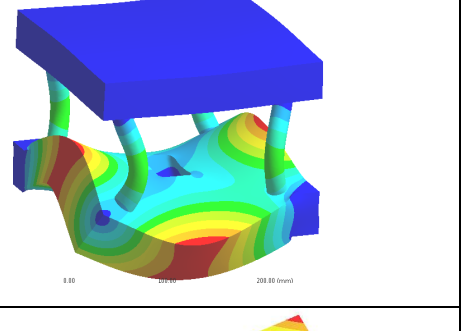
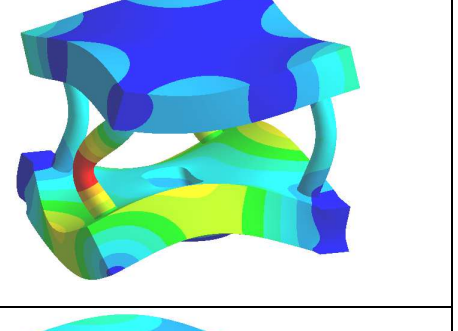
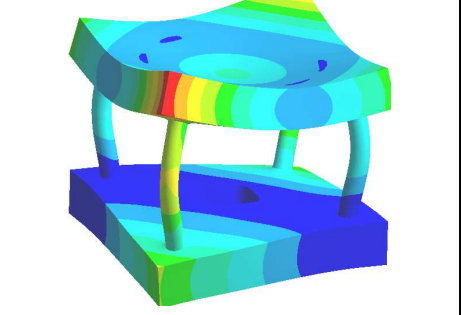
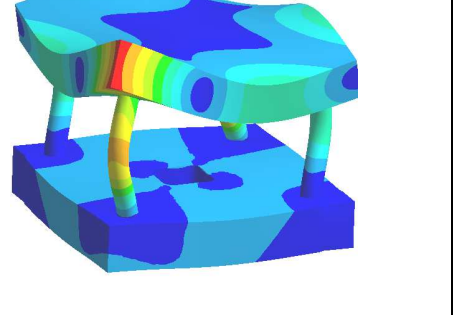
Закінчення табл. 3.4

Частота, кГц	Власні форми коливань	Частота, кГц	Власні форми коливань
5,07		5,36	
5,66		6,27	

Таблиця 3.5 – Власні форми коливань блока штампа (Solid-постановка)

Частота, кГц	Власні форми коливань	Частота, кГц	Власні форми коливань
0,26		0,27	
0,36		1,23	

Закінчення табл. 3.5

Частота, кГц	Власні форми коливань	Частота, кГц	Власні форми коливань
1,29	 <p>13,786 Max 12,254 10,723 9,1908 7,659 6,1272 4,5954 3,0636 1,5318 0 Min</p>	1,98	 <p>13,296 Max 11,819 10,342 8,8642 7,3868 5,9095 4,4321 2,9547 1,4774 0 Min</p>
2,68	 <p>17,235 Max 15,32 13,405 11,49 9,5751 7,6601 5,7451 3,83 1,915 0 Min</p>	3,08	 <p>16,514 Max 14,679 12,844 11,009 9,1742 7,3394 5,5045 3,6697 1,8348 0 Min</p>
3,23	 <p>15,508 Max 13,785 12,062 10,338 8,6154 6,8923 5,1692 3,4462 1,7231 0 Min</p>	3,8	 <p>24,111 Max 21,432 18,753 16,074 13,395 10,716 8,0368 5,3579 2,6789 0 Min</p>
4,43	 <p>16,691 Max 14,837 12,982 11,127 9,2729 7,4183 5,5637 3,7092 1,8546 0 Min</p>	4,5	 <p>18,798 Max 16,709 14,621 12,532 10,443 8,3546 6,2659 4,1773 2,0886 0 Min</p>
4,53	 <p>21,517 Max 19,126 16,735 14,344 11,954 9,563 7,1722 4,7815 2,3907 0 Min</p>	5,13	 <p>17,601 Max 15,645 13,69 11,734 9,7782 7,8226 5,8669 3,9113 1,9556 0 Min</p>

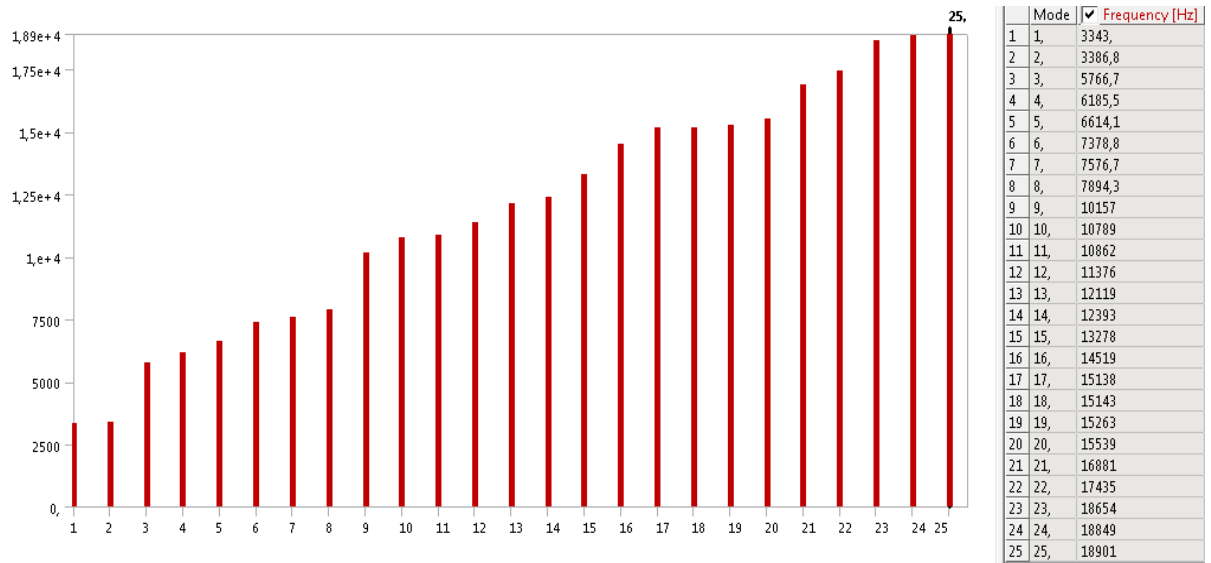


Рисунок 3.6 – Спектр власних частот коливань (Гц)
нижньої базової плити (Shell-постановка)
(вісь абсцис – номери власних частот)

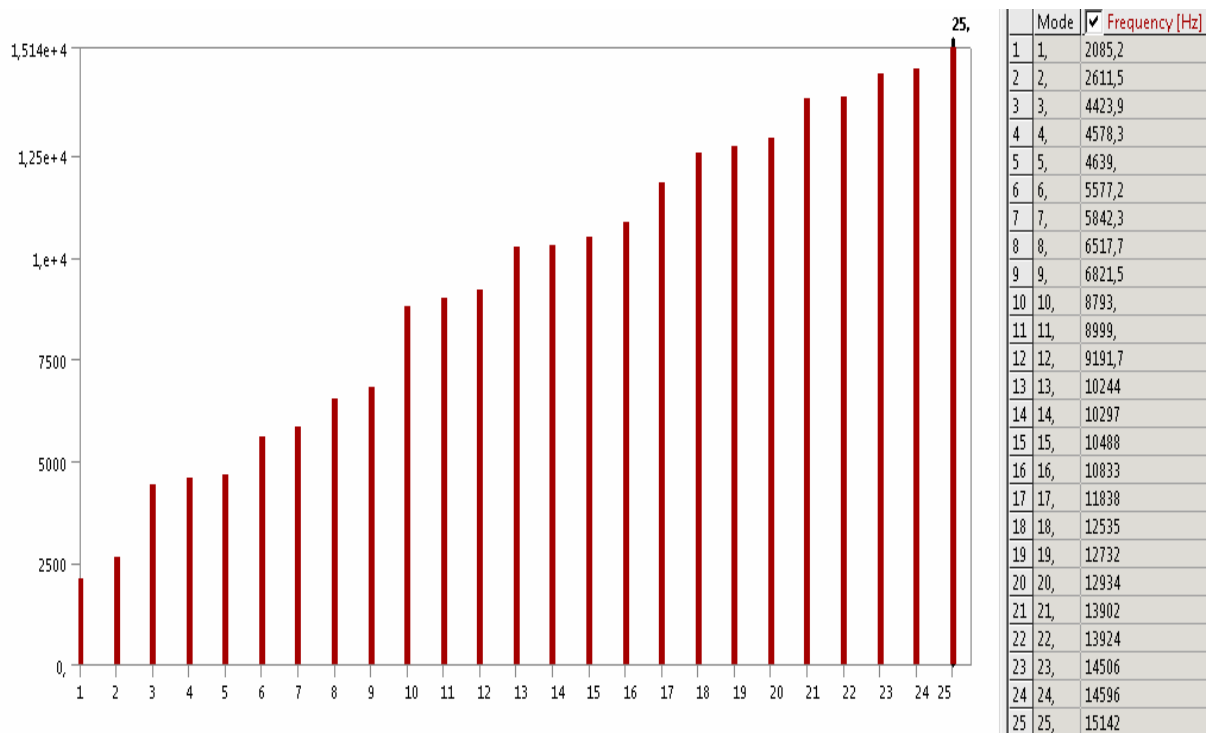


Рисунок 3.7 – Спектр власних частот коливань (Гц)
нижньої базової плити (Solid-постановка)
(вісь абсцис – номери власних частот)

Що стосується загальних закономірностей зміни власних частот коливань, то для блока РШ нижні власні частоти на порядок нижчі, ніж у окремо

взятої базової плити. Це можна пояснити появою у досліджуваній системі низькочастотної складової – масивної верхньої базової плити, з'єднаної із більш жорсткою закріпленою нижньою базовою плитою податливими напрямними колонками. У результаті нижні власні частоти коливань знижуються на порядок, проявляючись на яскраво виражених "стрижневих" і "пластинчастих" формах, що відповідають вигину колонок верхньої плити або їх крутильним формам. Однак і в такому випадку нижня межа спектру власних частот коливань усієї конструкції набагато вища частоти збудження від сили штампування.

Крім того, враховуючи додатковий зв'язок з повзуном преса, а також замикання верхньої та нижньої базових плит через змінний пакет і заготовку в процесі штампування, слід очікувати подальшого зростання власних частот коливань блоку. Відповідно, можна зробити висновок про правомірність квазістатичної постановки задачі про визначення напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення.

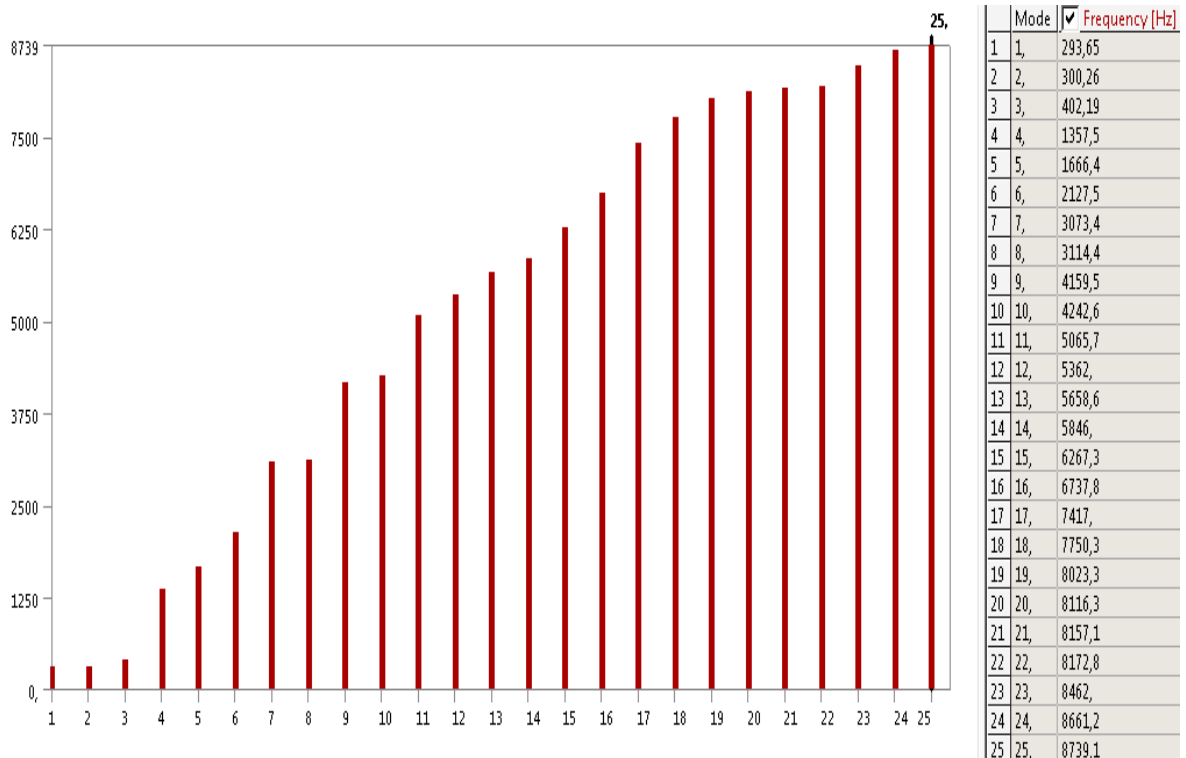


Рисунок 3.8 – Спектр власних частот коливань (Гц) блока штампа (Shell-конструктиви) (вісь абсцис – номери власних частот)

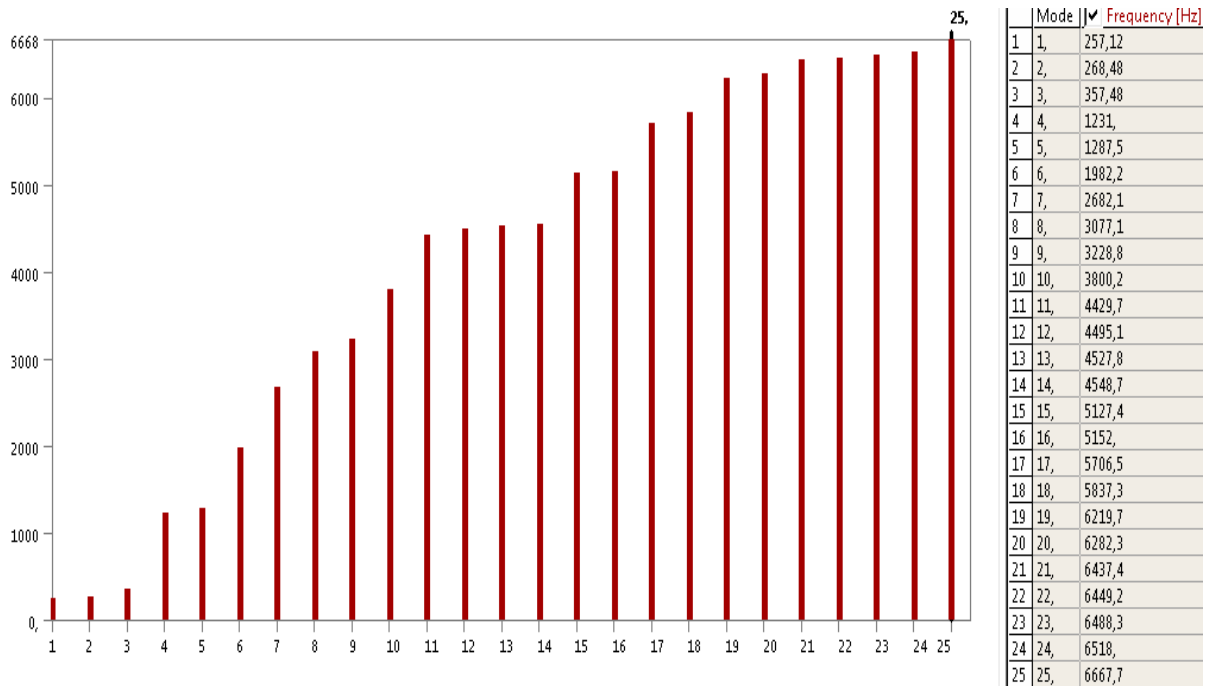


Рисунок 3.9 – Спектр власних частот коливань блока штампа (Гц)
(Solid-постановка) (вісь абсцис – номери власних частот)

Загальним висновком з аналізу наведених результатів впливає, що власні частоти коливань базових плит знаходяться на рівні 1 – 2 кГц і більше, що істотно вище, ніж основна частота прикладання сили штампування $P_{шт}(t)$. Вищі гармоніки, як правило, характеризуються більш високими характеристиками демпфування. Відповідно, при моделюванні напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення можна, як уже зазначалося, застосовувати квазістатичний підхід, розглядаючи $P_{шт}$ як часовий параметр і не прив'язуючись до додаткових інерційних ефектів.

3.6 Дослідження напружено-деформованого стану елементів штампів для розділових операцій

Розрахункові схеми пери дослідженні напружено-деформованого стану елементів досліджених штампів будуються або на основі виділення окремих

деталей штампів (у цьому випадку дія інших замінюється відповідними граничними умовами і силами навантаження), або на основі дослідження окремих груп деталей. Наприклад, використовуються "ізолювані" розрахункові схеми (тобто напружено-деформований стан досліджується для окремо взятих матриць, базових плит, знімачів тощо). Також будуються низькорівневі розрахункові схеми, що поєднують умовами контактного сполучення тільки 2÷3 сусідні деталі (наприклад, матрицю і пуансон, які взаємодіють через матеріал, що штампується, або нижню базову плиту штампа у контакті з підштамповою плитою преса). У той же час розділовий штамп характеризується якраз комплексною взаємодією всіх деталей та збиран (див. розд. 1). У зв'язку з цим актуальною задачею є розробка комплексних розрахункових схем елементів штампів для розділових операцій, які інтегрують у собі всі їхні основні сполучені деталі і вузли.

Формування комплексних розрахункових схем елементів розділових штампів

Розглянуто новий підхід до формування комплексних розрахункових схем елементів розділових штампів, що базується на системному аналізі технологічних систем "прес – штамп – ріжучі частини – заготовка". Відповідно [31], розглянемо різнорівневі підсистеми цієї технологічної системи. Однак, на відміну від підсистеми самого нижнього рівня (див. рис. 1.4), пропонується розглянути систему середнього рівня. У цій підсистемі присутні всі основні елементи, що забезпечують робочий процес штампування, базування і взаємний відносний рух частин штампів.

Для формування комплексних розрахункових схем досліджені основні елементи розділових штампів, які вступають у силову взаємодію (див. рис. 1.1).

Основні елементи штампа базуються на нижній і верхній базових плитах. Визначальний робочий рух здійснюється шляхом переміщення верхньої базової плити за напрямними колонками. При цьому в силу деформування нижньої базової плити штампа колонки, які запресовані або з'єднані за допо-

могою склеювання (наприклад, заливкою зазору між колонкою і плитою епоксидним компаундом або іншим твердіючим складом), деформуються, вступаючи у верхній частині в зоні у напрямних отворів у контактне сполучення з верхньою базовою плитою. Під час такої взаємодії виникають нормальні і дотичні (від тертя) сили, що включаються у силові потоки в технологічній підсистемі "стіл преса – блок штампа – пакет – заготовка". Одночасно відповідні сили надають зворотний вплив на нижню базову плиту. Таким чином, точний розрахунок цих сил можливий тільки на основі аналізу контактної взаємодії, у яку опосередковано залучені не тільки сусідні, які безпосередньо механічно сполучаються, але і віддалені один від одного елементи штампів.

Крім розглянутих елементів, необхідно також врахувати контактну взаємодію у сполученні "пакет – нижня базова плита" і у сполученні "нижня базова плита – підштампова плита преса". На рис. 3.10 представлені елементи технологічної системи, що досліджується, і відповідні характерні зони контактної взаємодії. Тут k_1 – контакт "колонки – верхня базова плита"; k_2 – контакт "колонки – фіксуючий шар – нижня базова плита"; k_3 – площина обпирання нижньої базової плити на підштамповую плиту штампа; k_4 – площина обпирання пакету на нижню базову плиту.

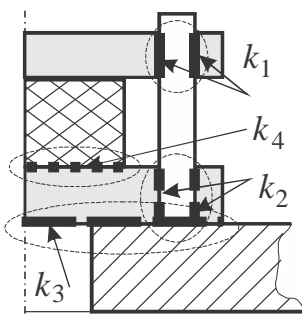
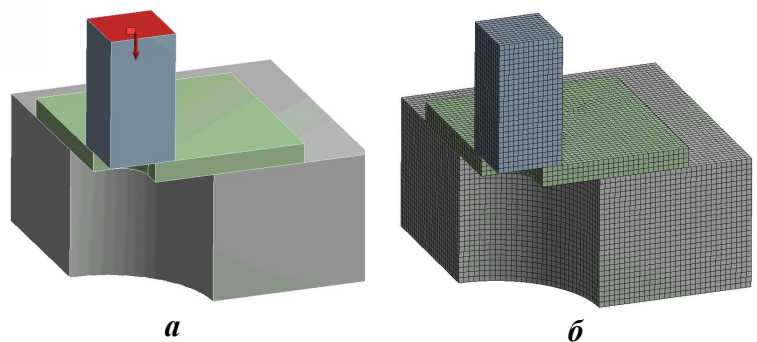


Рисунок 3.10 – Елементи технологічної системи, що досліджується, та відповідні характерні зони контактної взаємодії



a – геометрична модель,
б – скінченно-елементна модель

Рисунок 3.11 – Нижня базова плита у взаємодії зі змінним пакетом і підштамповою плитою преса

Таким чином, комплексна розрахункова схема РШ передбачає наявність множинного контакту у з'єднаннях елементів штампа. При цьому сили, що виникають між контактуючими елементами, визначаються в ході розв'язання контактної задачі, і є у ній додатковими невідомими. У цьому полягає принципова відмінність комплексної розрахункової схеми, що створена, від раніше використаних [30, 31].

Випадок 1. Як ілюстрацію розглянемо контактну взаємодію тестової конструкції, схема якої – на рис. 3.11: змінний пакет впливає на нижню базову плиту, яка обпирається на підштампову плиту преса. Варіюються: діаметр провального отвору у підштамповій плиті преса – параметр p_2 (у діапазоні 160÷360 мм); товщина нижньої базової плити штампа – параметр p_1 (у діапазоні 15÷90 мм). Сили штампування $P_{шт}$ (див. рис. 3.10) – 50 кН, габарити штампа – 240×240 мм, габарити пакету 100×100 мм. Матеріал основних деталей – сталь 40Х (модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$). У силу симетрії тут і далі (*Випадок 2*) розглянуто 1/4 конструкції.

На рис. 3.12–3.18 наведено характерні картини розподілу компонент напружено-деформованого стану елементів штампа, а на рис. 3.19–3.25 – інтегральні залежності характеристик НДС від варійованих параметрів.

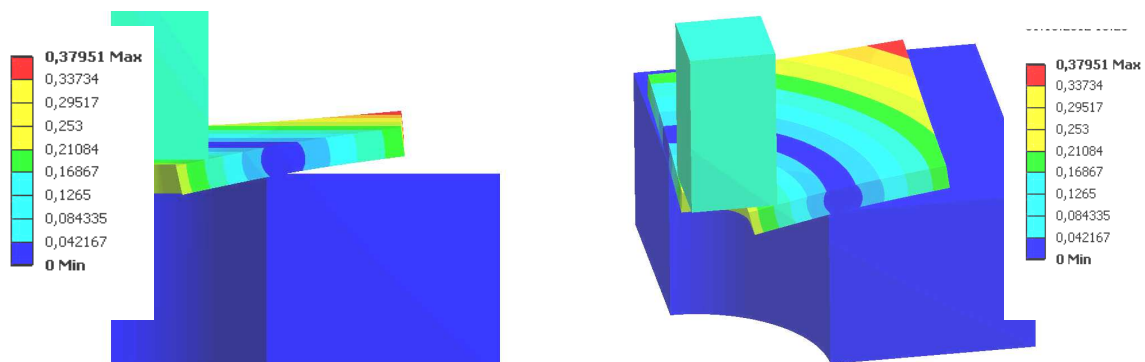


Рисунок 3.12 – Результати дослідження НДС елементів штампа (*Випадок 1*): розподіл повних переміщень, мм

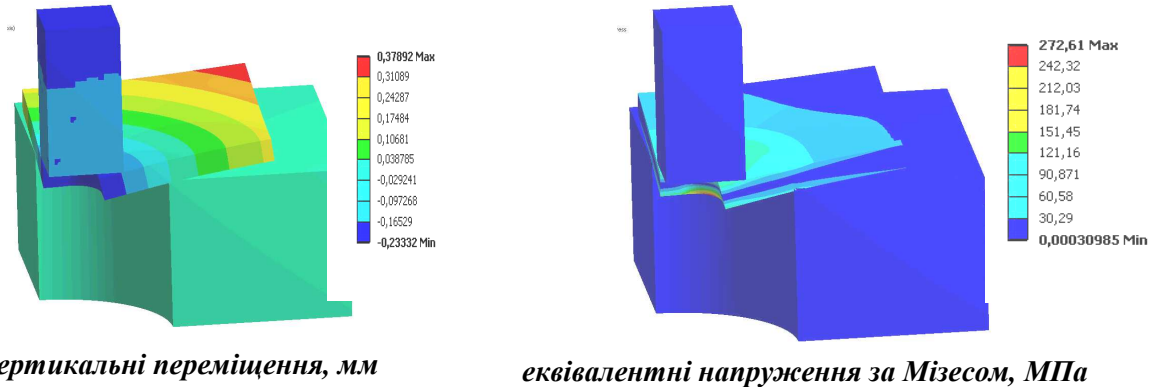


Рисунок 3.13 – Результати дослідження НДС елементів штампa (Випадок 1)

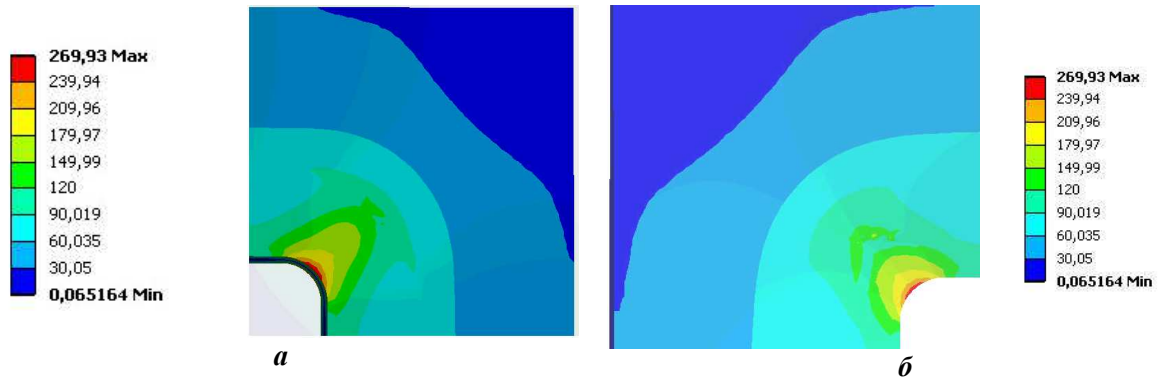


Рисунок 3.14 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом, МПа, у нижній базовій плиті у площині сполучення (Випадок 1)

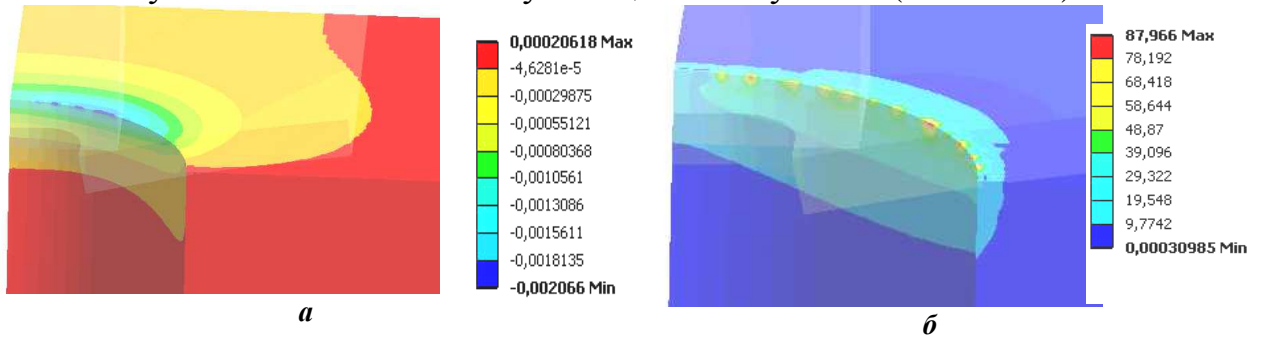


Рисунок 3.15 – Результати дослідження НДС елементів штампa у підштамповій плиті преса (Випадок 1)

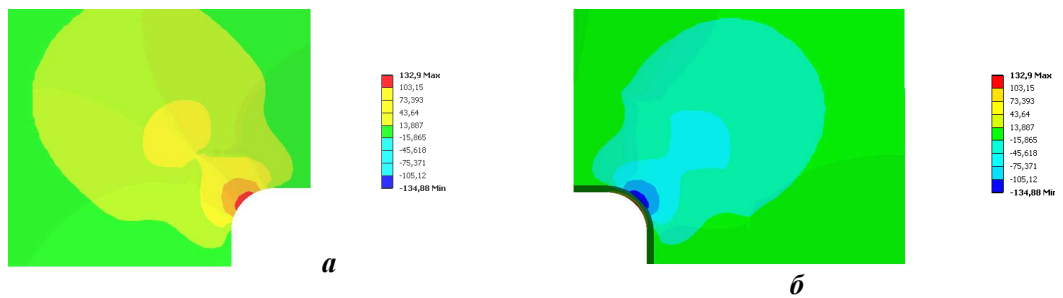


Рисунок 3.16 – Дотичні напруження, МПа, у базовій плиті штампa (Випадок 1)

Рисунок 3.16 – Дотичні напруження, МПа, у базовій плиті штампa (Випадок 1)

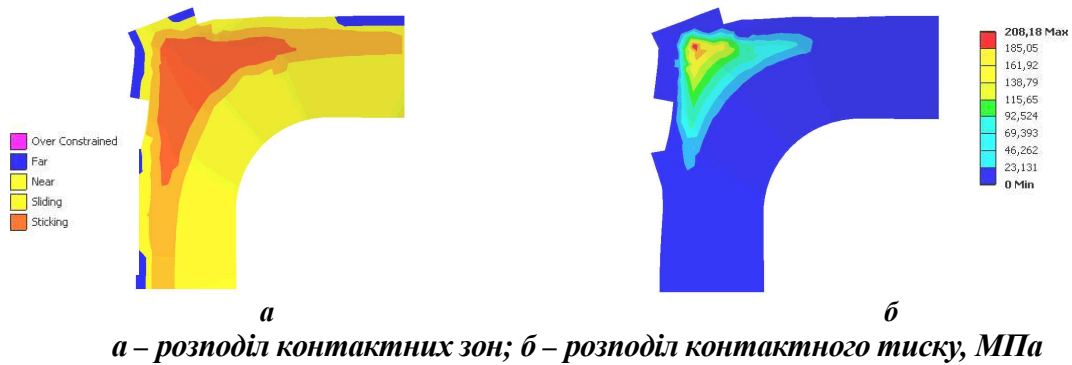
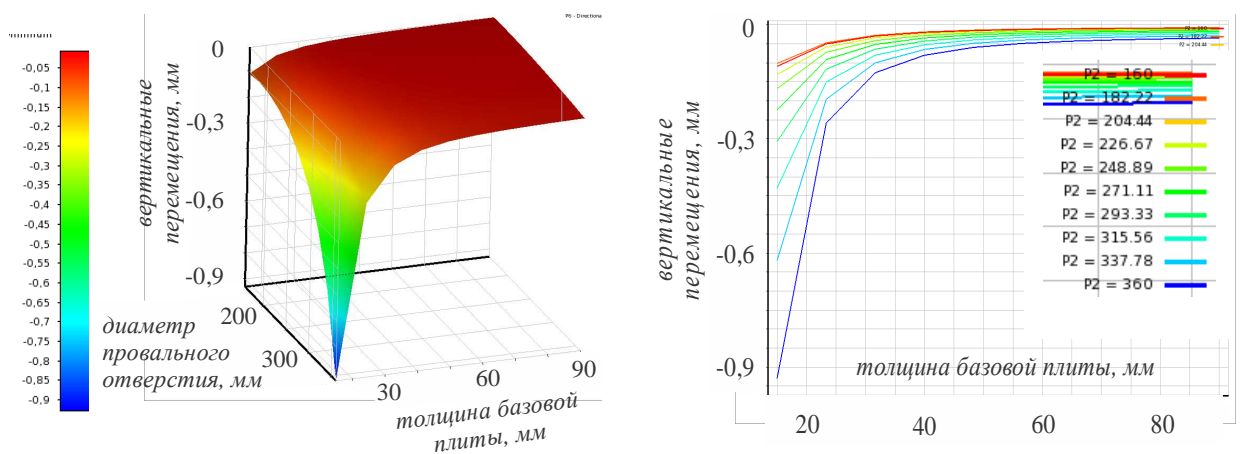


Рисунок 3.17 – Результати дослідження НДС елементів штамп у сполученні змінного пакету та базової плити (*Випадок 1*)



Аналіз характеру розподілу контактного тиску і напружень свідчить, що вони концентруються в кутових областях та зонах зміни геометричної форми (див. рис. 3.16–3.18). При цьому форма контактних зон не повторює форму початкового геометричного контакту, а розташовується у вигляді вузької смужки на периферії контакту.



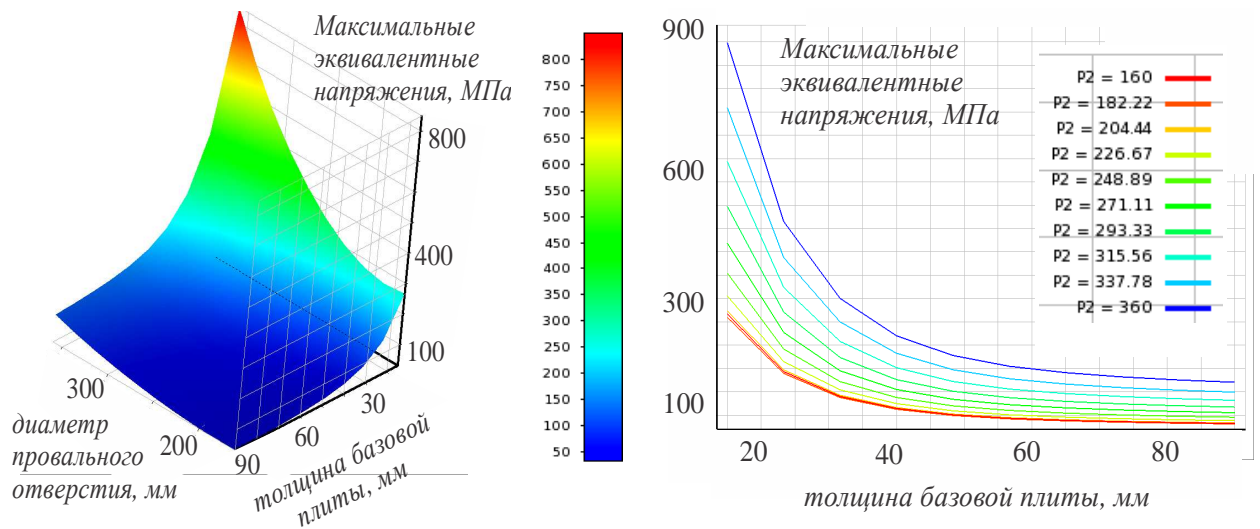


Рисунок 3.20 – Залежності характеристик НДС від варійованих параметрів (Випадок 1): зміна максимальних еквівалентних напружень у базовій плиті штамп

На наведених на рис.3.19–3.25 залежностях також спостерігається нерівномірний характер залежностей компонент НДС від товщини плити та діаметру провального отвору. Зокрема, при зменшенні товщини базової плити від 40 мм до 30 мм (див. рис. 3.19, 3.22) напруження та переміщення зростають у 1,5-3,0 рази. Відповідно, рекомендований діапазон товщини базової плити – 40-50 мм.

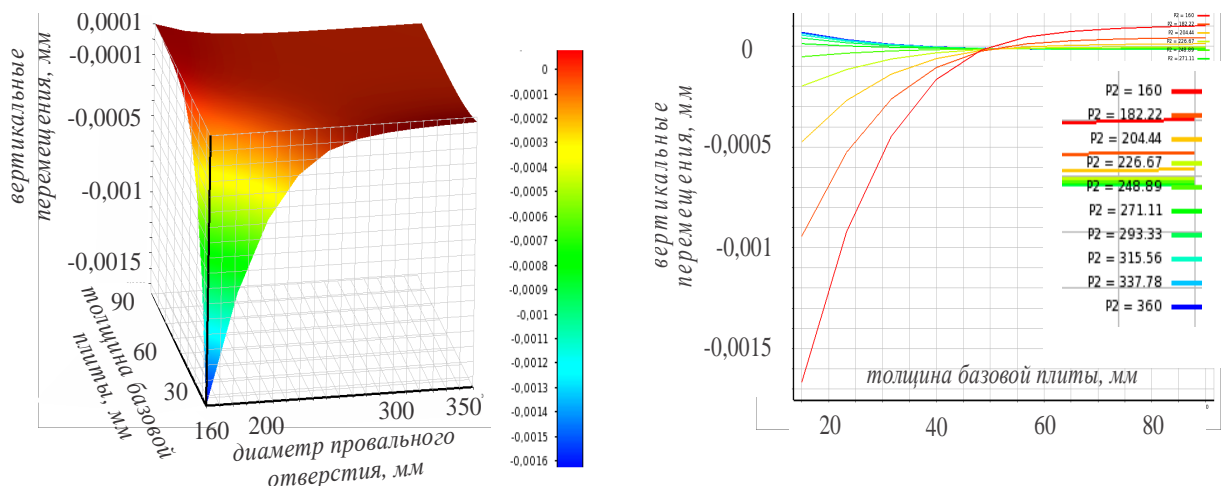


Рисунок 3.21 – Залежності характеристик НДС від варійованих параметрів (Випадок 1): зміна мінімальних (максимальних за величиною) вертикальних переміщень у підштамповій плиті преса

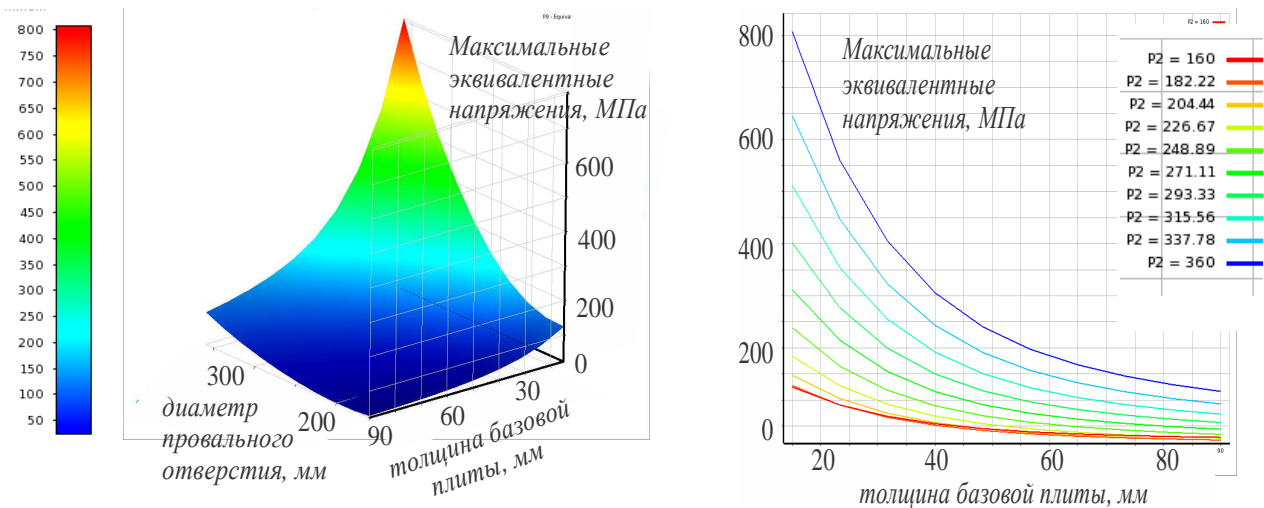


Рисунок 3.22 – Залежності характеристик НДС від варійованих параметрів (Випадок 1): зміна максимальних еквівалентних напружень у підштамповій плиті преса

Отримані залежності зміни картин розподілів компонент напружено-деформованого стану елементів технологічної підсистеми "пакет – нижня база-ва плита штампа – підштампова плита преса" дають можливість зробити наступні висновки.

1. Напруження в елементах дослідженої підсистеми концентруються у зонах їх механічного контакту.

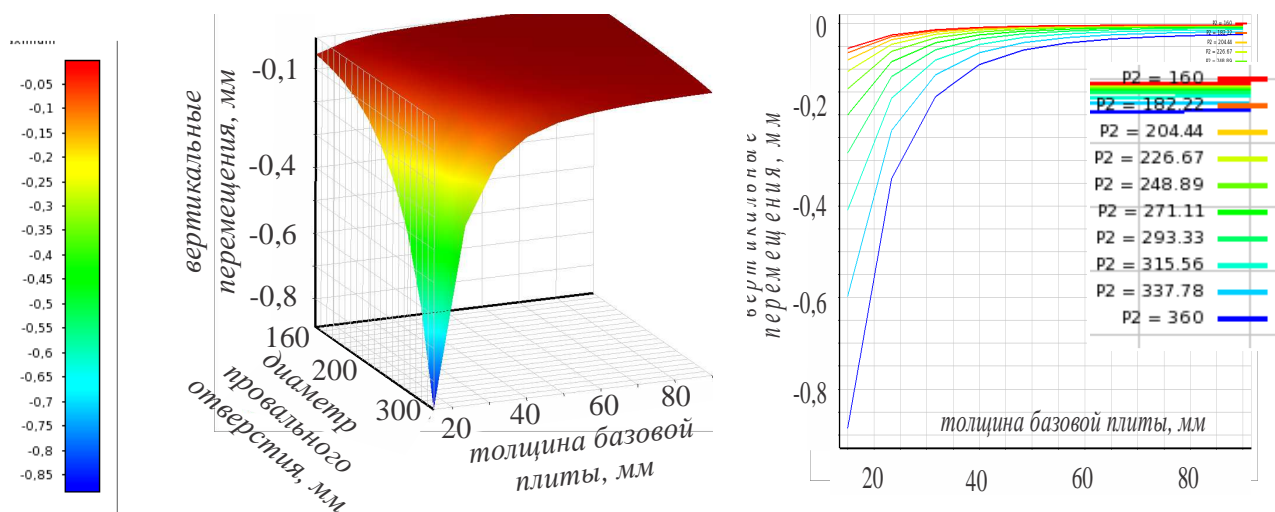


Рисунок 3.23 – Залежності характеристик НДС від варійованих параметрів (Випадок 1): зміна мінімальних (максимальних за величиною) вертикальних переміщень у змінному пакеті

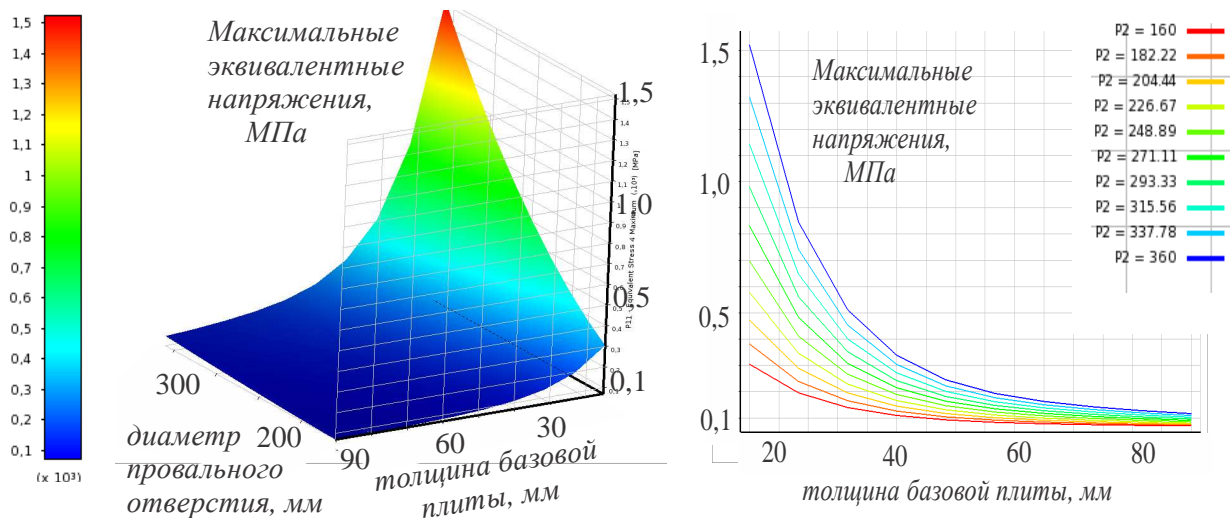


Рисунок 3.24 – Залежності характеристик НДС від варійованих параметрів (*Випадок 1*): зміна максимальних еквівалентних напружень у змінному пакеті

2. Напруження і контактний тиск розподіляються на площах контактного сполучення нерівномірно.

3. Інтегральні залежності характеристик напружено-деформованого стану від варійованих параметрів (в цьому випадку – товщина базової плити та діаметр провального отвору) відповідають "гіперболічній" поведінці: різке зростання при зниженні об'єму матеріалу деталі нижче певної межі, практично незмінна величина – при зростанні цього об'єму вище деякої іншої межі та плавна зміна у перехідному діапазоні.

Таким чином, отримані картини розподілів характеристик напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення визначають найбільш навантажені їх зони, а побудовані поверхні відгуку дають можливість розв'язувати задачу обґрунтування проектно-технологічних параметрів штампів за критеріями стійкості, точності, міцності та жорсткості.

Випадок 2. Для дослідження взаємодії елементів підсистеми "нижня базова плита штампа – напрямні колонки" розглянемо контактну взаємодію тестової конструкції, схема якої – на рис. 3.26. Сили штампування, матеріал і розміри елементів штампа – ті ж, що і у *Випадку 1*.

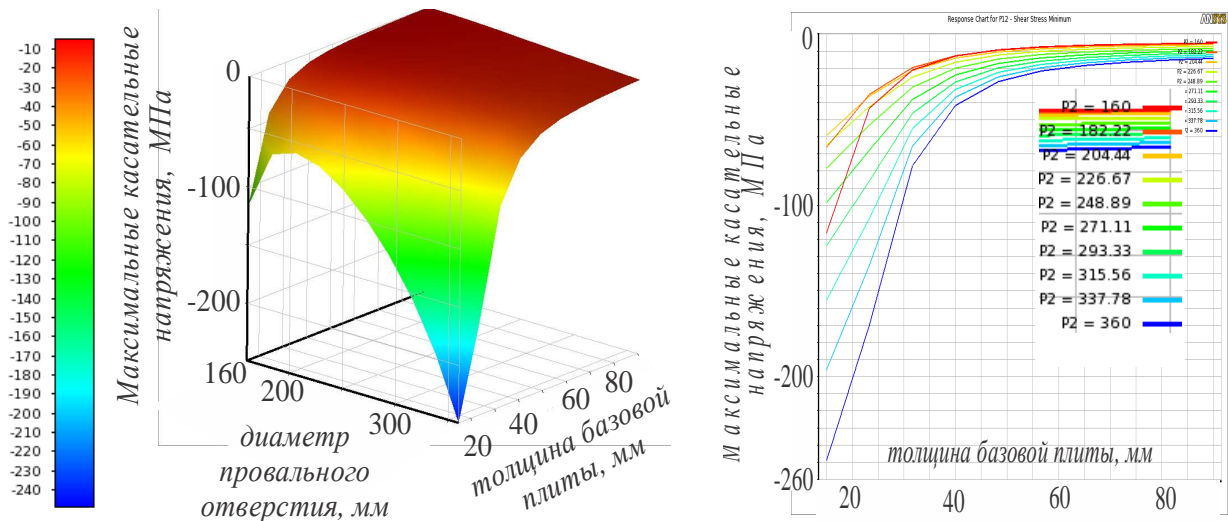


Рисунок 3.25 – Залежності характеристик НДС від варійованих параметрів (*Випадок 1*): зміна мінімальних (максимальних за величиною) дотичних напружень у базовій плиті штамп

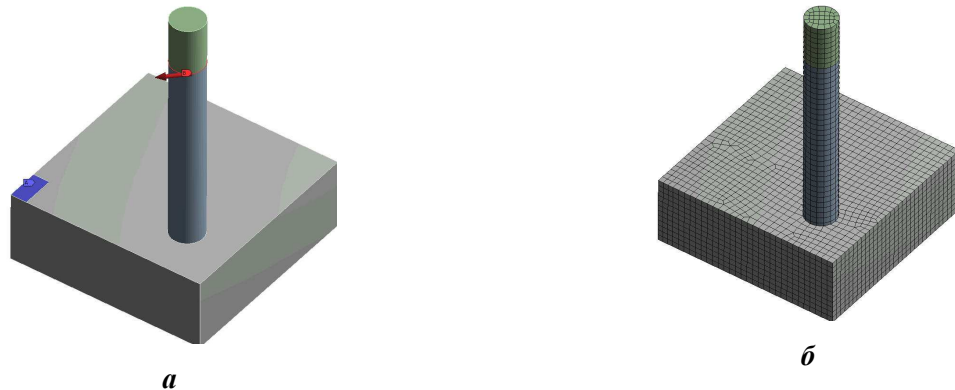


Рисунок 3.26 – Геометрична (*a*) і скінченно-елементна (*б*) моделі взаємодії напрямної колонки з нижньою базовою плитою штамп

Випадок 2.1. Досліджується вплив сили, що діє з боку верхньої базової плити штамп (параметр $p_1 = 0 \div 10$ кН) через втулку на рівні її верхнього зрізу (на висоті 120 мм) під кутом до площини плити (параметр $p_2 = 0 \div \pi/4$). Втулка діаметром $\varnothing 20$ мм посаджена у нижній плиті товщиною 45 мм з натягом (параметр $p_3 = 0.001, 0.005, 0.1, 0.2$ мм). Картини розподілу напружено-деформованого стану наведено на рис. 3.27–3.30, а на рис. 3.31–3.34 – залежності характеристик НДС від варійованих параметрів.

Як видно з представлених графіків та розподілів, спостерігаються наступні закономірності.

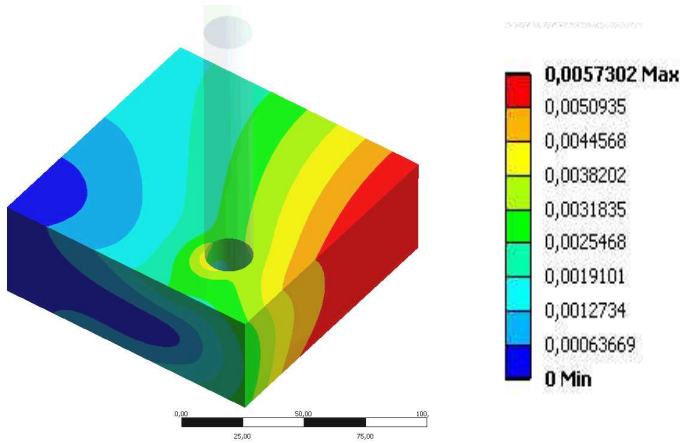


Рисунок 3.27 – Розподіл повних переміщень, мм, у нижній базовій плиті штампа (Випадок 2)

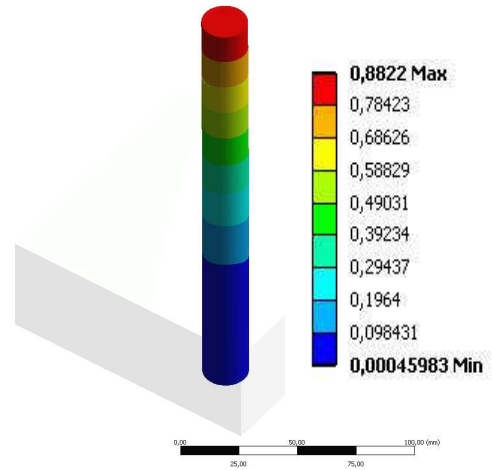


Рисунок 3.28 – Розподіл повних переміщень, мм, у колонці штампа (Випадок 2)

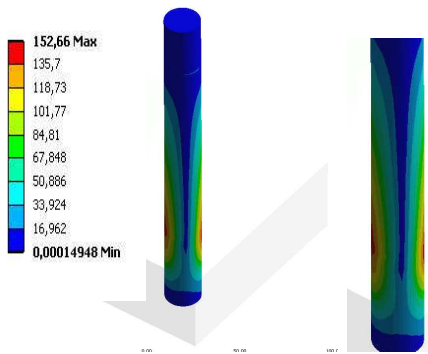


Рисунок 3.29 – Розподіл еквівалентних (за Мізесом) Напружень, МПа, у колонці штампа (Випадок 2)

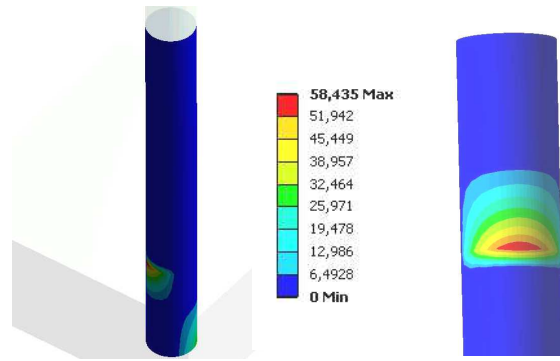


Рисунок 3.30 – Розподіл контактних напружень, МПа, у сполученні колонки з плитою штампа (Випадок 2)

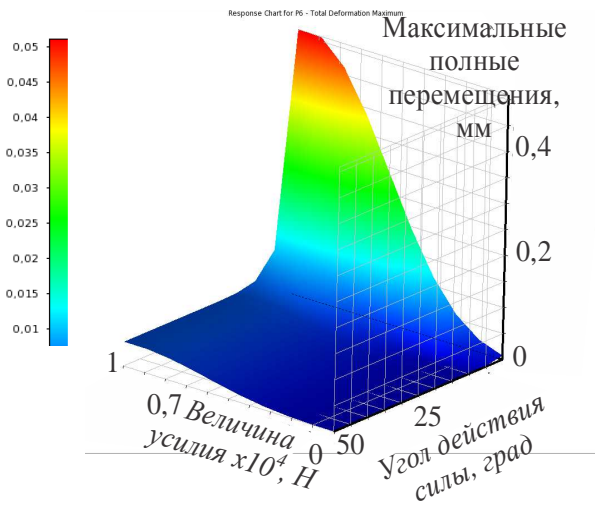
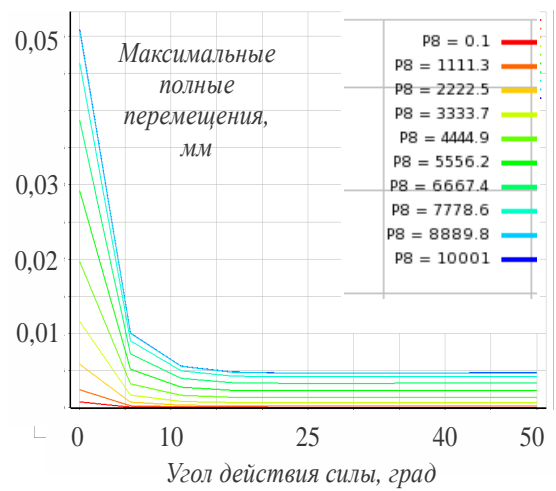


Рисунок 3.31 – Залежність повних переміщень, мм, верхнього зрізу колонки від параметрів p_1, p_2 (Випадок 2.1)



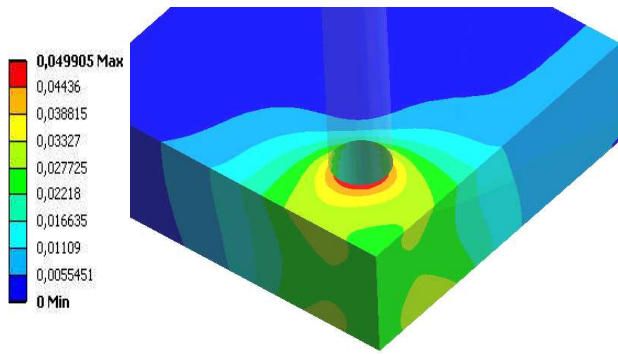


Рисунок 3.32 – Розподіли повних переміщень, мм, у нижній базовій плиті штампа при натягу 0,1 мм (Випадок 2.1)

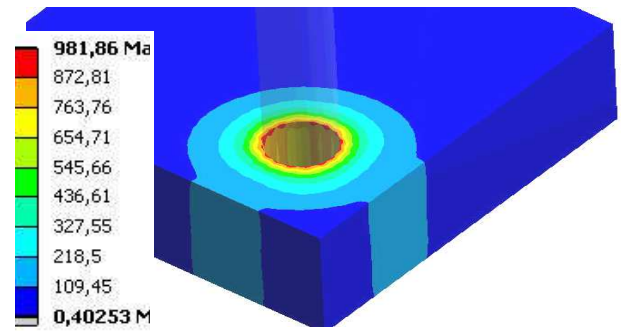


Рисунок 3.33 – Розподіли максимальних еквівалентних напружень, МПа, у нижній базовій плиті штампа при натягу 0,1 мм (Випадок 2.1)

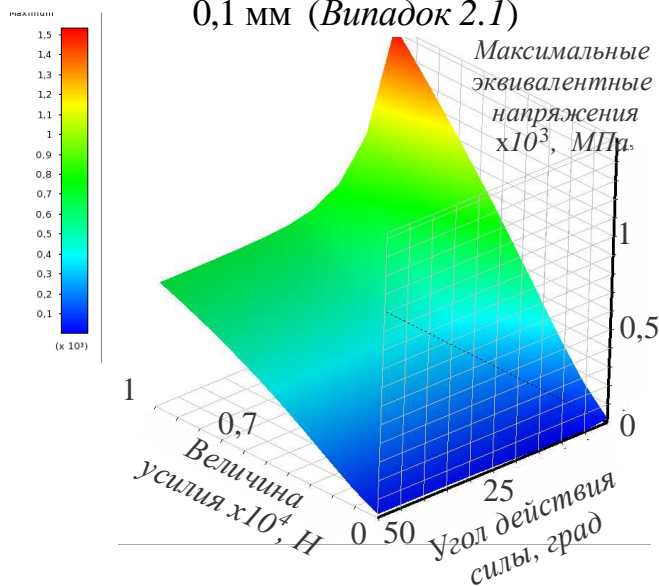
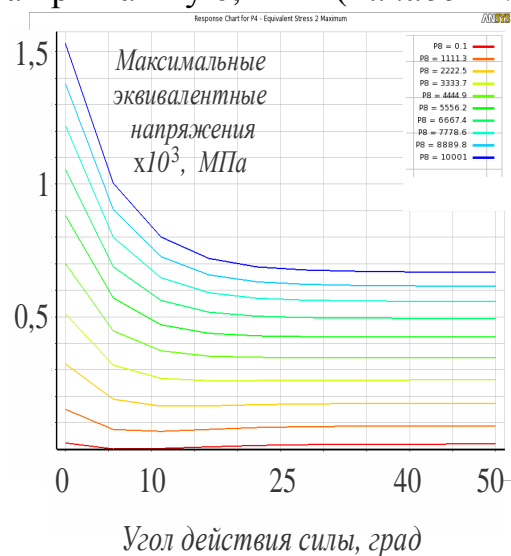


Рисунок 3.34 – Залежність максимальних еквівалентних напружень від параметрів p_1 , p_2 (Випадок 2.1)



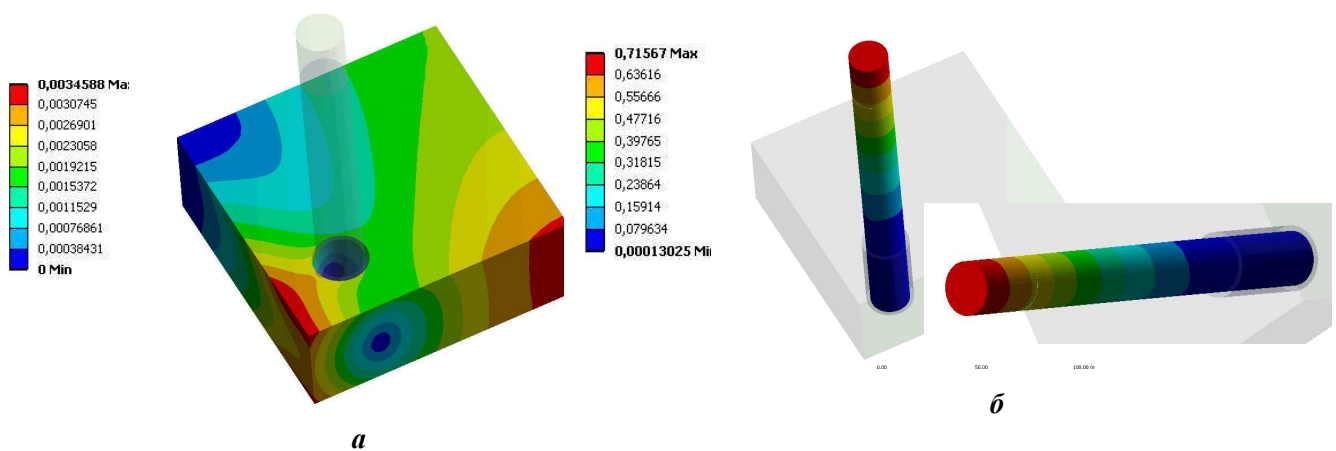
1. Найбільш навантаженими від горизонтальних сил зонами є ділянки, що примикають до з'єднання колонок з плитами.
2. Контактний тиск у сполученні "колонка – плита" розподіляється нерівномірно, і чим менший натяг, тим більша ця нерівномірність.
3. Інтегральні характеристики напружено-деформованого стану демонструють приблизно таку ж залежність від конструктивних параметрів, як і описана вище (див. задачу 1) "гіперболічна" залежність, та більш рівномірну і плавну – від параметрів навантаження.
4. Переміщення верхнього зрізу (див. рис.3.31) колонок практично незмінні

при варіюванні кута дії сили до рівня 10 градусів, а потім різко зростають у 1,8-2,0 рази при зменшенні кута до 5 градусів, такі ж залежності і для напружень (див.рис.3.34) проте зростання складає 20-25%.

Як впливає з аналізу отриманих результатів, напружено-деформований стан цієї підсистеми має свої особливості:

- напруження в цьому випадку набагато нижчі, ніж у випадку посадки колонок з натягом;
- переміщення колонок від дії горизонтальних сил на 10÷15% вищі, ніж у випадку посадки колонок з натягом. Така особливість пояснюється характером взаємодії колонки з нижньою плитою. Це не дає можливості оцінити граничні сили за традиційними методами, які передбачають рівномірний розподіл напружень. Тому при їх застосуванні виникає похибка у 1,8÷2,0 рази;

Випадок 2.2. Досліджується вплив сили, що діє з боку верхньої базової плити штампа (параметр $p_1 = 0 \div 10$ кН) через втулку на рівні її верхнього зрізу (на висоті 120мм) під кутом до площини плити (параметр $p_2 = 0 \div \pi/4$). Втулка діаметром $\varnothing 20$ мм посаджена у нижній плиті товщиною 45 мм за допомогою клейового складу (товщина шару – параметр $p_3 = 2.0, 3.5, 5.0$ мм). Як фіксуєчий застосований склад на основі епоксидної смоли ($E = 3,2 \cdot 10^3$ МПа, $\nu = 0,45$). На рис. 3.35–3.39 наведено результати досліджень



a – у нижній базовій плиті, *б* – у колонці штампа

Рисунок 3.35 – Розподіл повних переміщень, мм (*Випадок 2.2*)

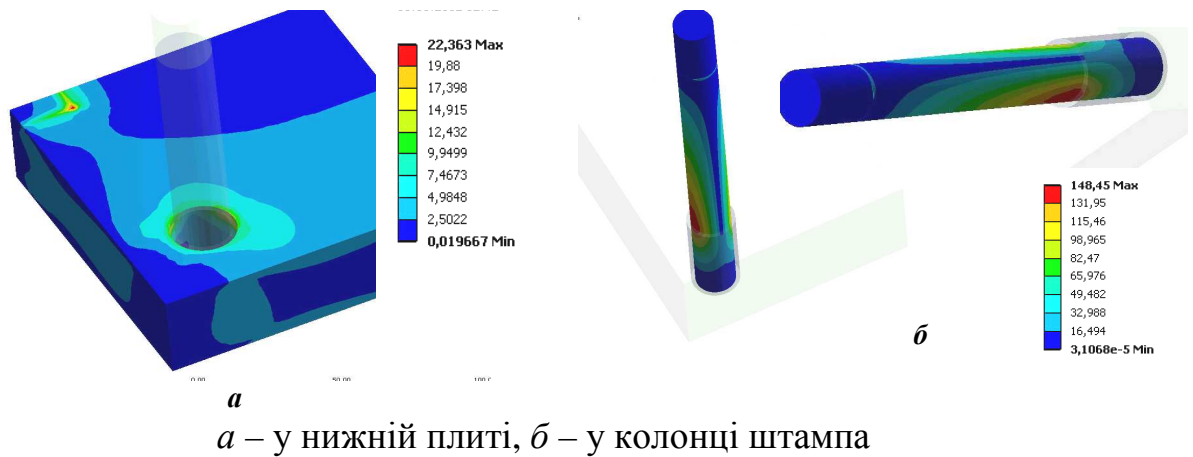


Рисунок 3.36 – Розподіл еквівалентних (за Мізесом) напружень, МПа
(Випадок 2.2)

На рис. 3.35–3.37, зокрема, представлені розподіли переміщень і напружень у тестовій конструкції. Видно, що розподіли контактного тиску у сполученнях елементів штампів далекі від рівномірних. Цей чинник істотно позначається на НДС усіх елементів штампів, що знаходяться у взаємодії, і його потрібно враховувати при формуванні більш адекватних, ніж традиційні, розрахункових схем елементів РШ.



Рисунок 3.37 – Розподіл повних переміщень, мм, і еквівалентних (за Мізесом) напружень, МПа, у фіксуючому шарі (Випадок 2.2)

Як впливає з аналізу отриманих результатів, напружено-деформований стан цієї підсистеми має свої особливості:

- напруження в цьому випадку набагато нижчі, ніж у випадку посадки колонок з натягом;
- переміщення колонок від дії горизонтальних сил на 10÷15% вищі, ніж

у випадку посадки колонок з натягом. Дана особливість пояснюється характером взаємодії колонки з нижньою плитою. Це не дає можливості оцінити граничні сили за традиційними методами, які передбачають рівномірний розподіл напружень. Тому при їх застосуванні виникає похибка у 1,8÷2,0 рази;

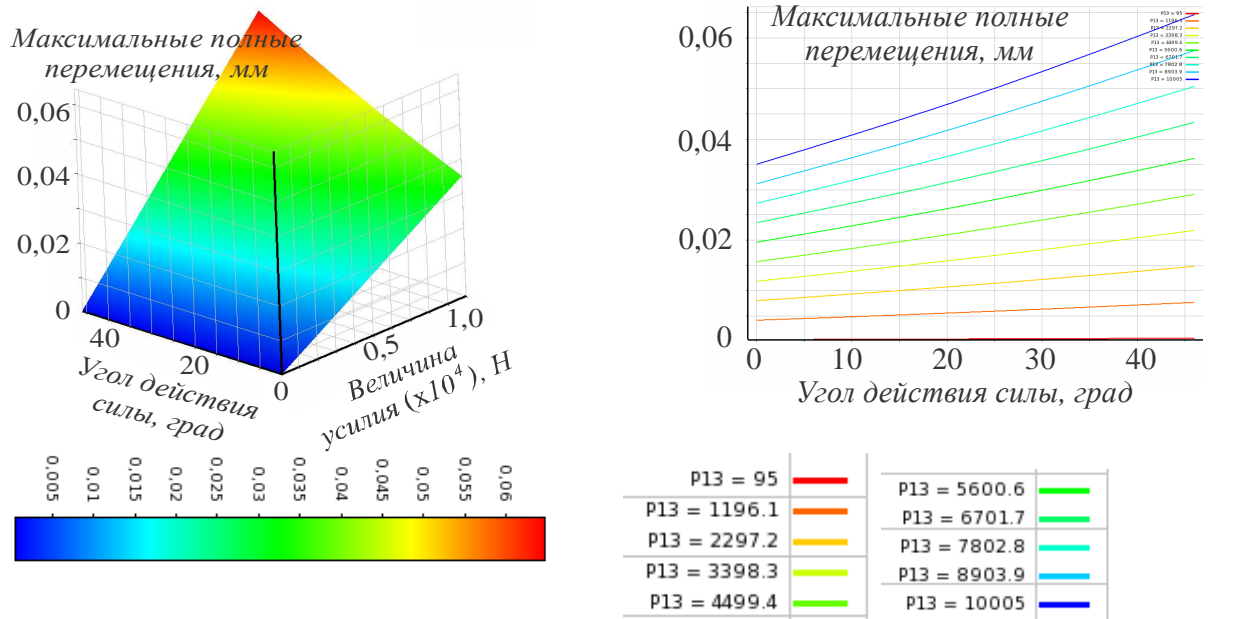


Рисунок 3.38 – Розподіл повних переміщень у нижній базовій плиті штампа (Випадок 2.2)

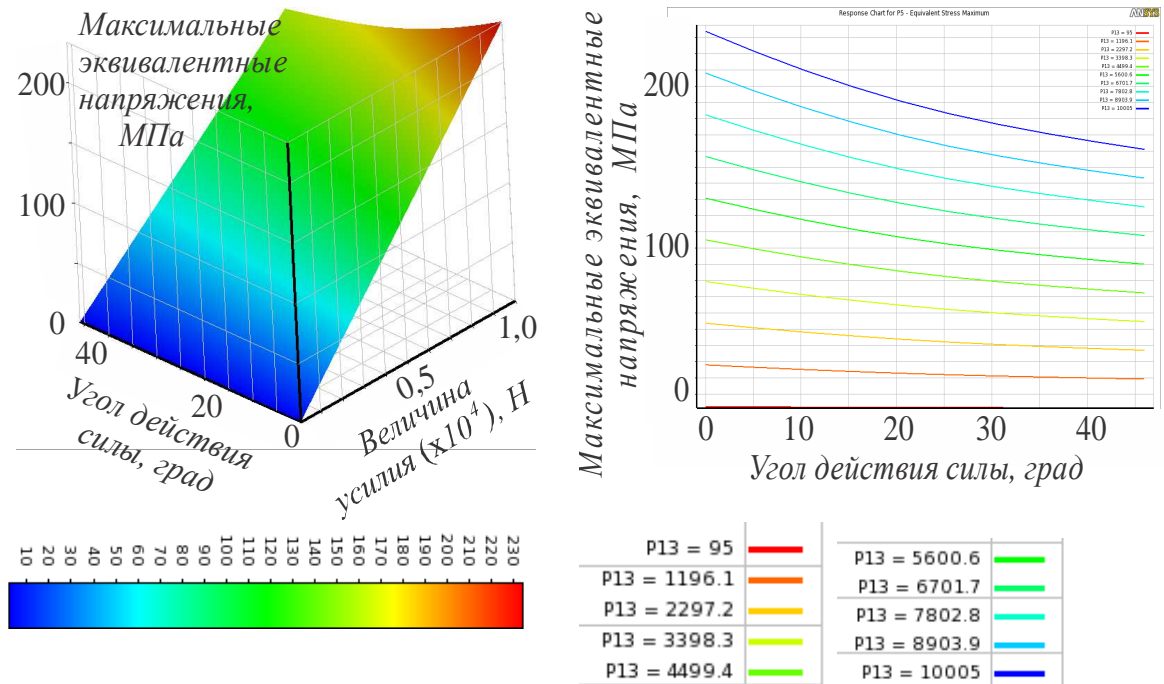


Рисунок 3.39 – Розподіл еквівалентних (за Мізесом) напружень у колонці штампа (Випадок 2.2)

- розподіл напружень у шарі складу 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.

- інтегральні залежності характеристик напружено-деформованого стану дослідженої підсистеми від усіх варійованих параметрів носять при- близно лінійний характер.

Таким чином, можна констатувати, що у підрозділі представлено підхід до створення комплексних розрахункових схем елементів штампів. Вони від- різняються від традиційних розрахункових схем включенням у єдину інтег- ровану розрахункову схему усіх основних елементів розділових штампів, причому з урахуванням їх контактної взаємодії значення контактного тиску визначається в ході розв'язання контактної задачі, а не задається заздалегідь відомим.

3.7 Дослідження множинного контакту елементів розділових штампів

Аналіз напружено-деформованого стану елементів системи "підштам- пова плита преса – нижня базова плита – пакет – напрямні колонки – верхня базова плита"

Описані вище розв'язання задач (див. підрозд. 3.6) є корисними з точки зору встановлення закономірностей зміни характеристик напружено- деформованого стану елементів штампового оснащення при варіюванні окре- мих проектно-технологічних параметрів або їх множини. У той же час у ство- рені розрахункові моделі були об'єднані не всі основні елементи штампа. У зв'я- зку з цим потрібно провести дослідження НДС з використанням моделі більш

високого (глибокого) рівня.

Зокрема, з цією метою була побудована модель розділового штампу у вигляді системи "підштамова плита преса – нижня базова плита – пакет – напрямні колонки – верхня базова плита" (рис. 3.40, в силу симетрії розглянуто 1/4 конструкції, сили штампування – 10 кН). На рис. 3.41 наведено картини розподілу контактної тиску у зонах k_1, k_2 (см. рис. 3.10), на рис. 3.42 – у k_2, k_3 .

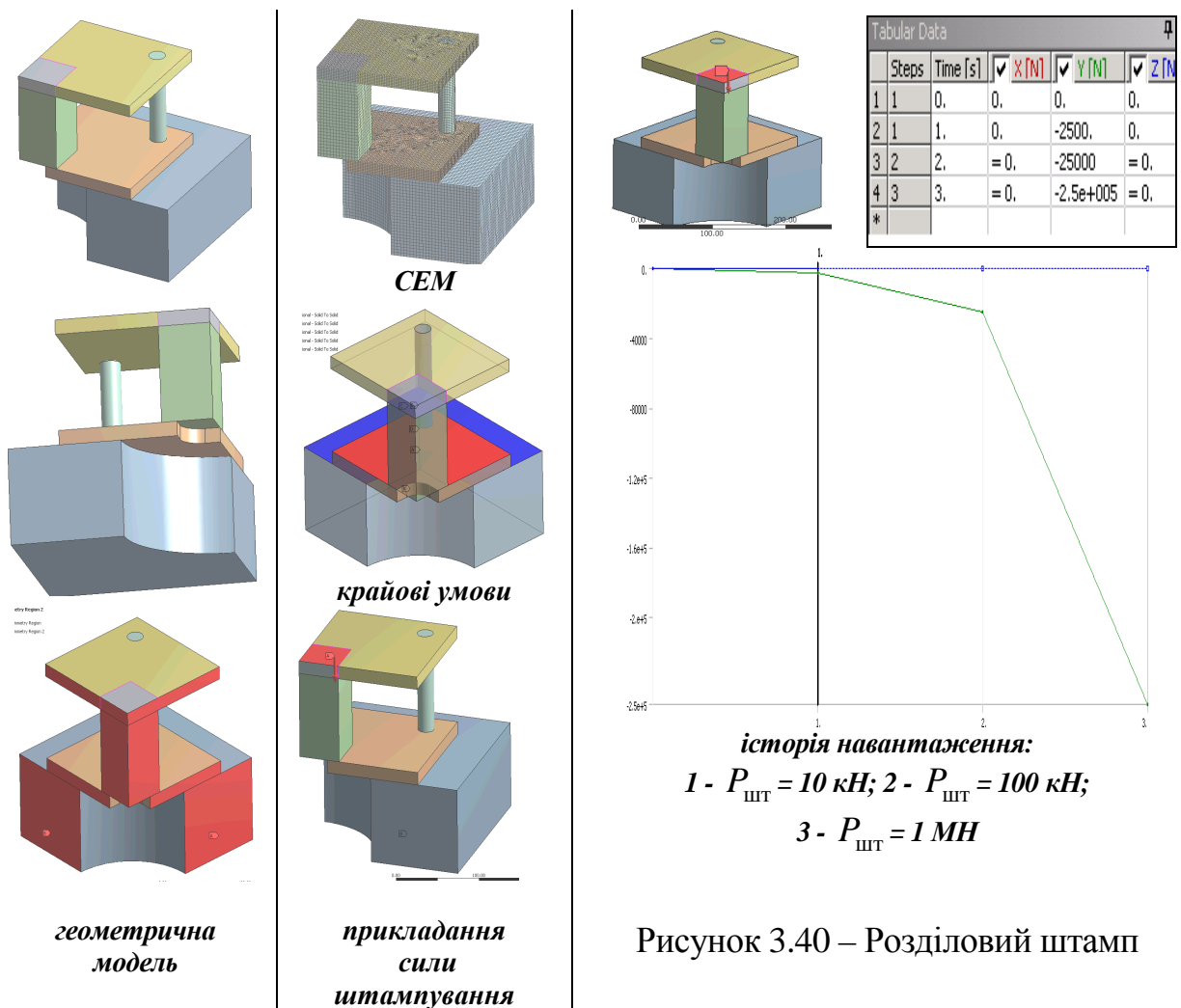
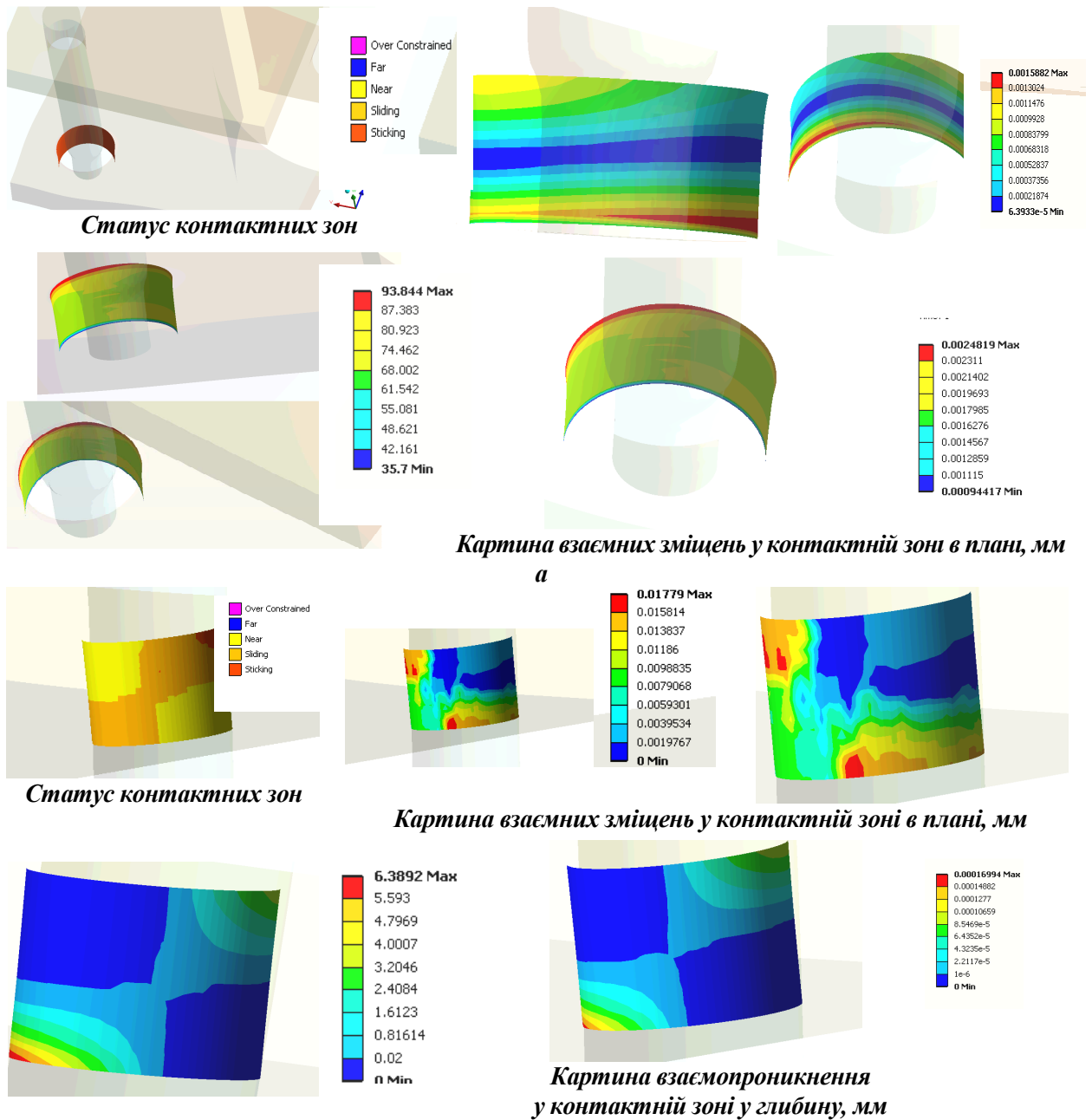


Рисунок 3.40 – Розділовий штамп

З наведених розподілів видно, що зазначені на частинних моделях (див. *Випадки 1, 2*) у підрозд. 3.6 закономірності, а саме щодо істотно нерівномірного розподілу контактної тиску у сполученнях елементів штампового оснащення, цілком і повністю підтверджуються. Те ж можна сказати і про розподіл повних переміщень, еквівалентних напружень за Мізесом (рис. 3.43).



$$a - k_2, \delta - k_1$$

Рисунок 3.41 – Картини розподілу контактного тиску, МПа, у зонах ($P_{шт} = 10 \text{ кН}$)

З усієї системи можна виокремити картини напружено-деформованого стану окремих елементів (рис. 3.44–3.59). Вони також дають підставу підтвердити прогнозовані особливості НДС, обґрунтовані частинних моделях: про концентрацію напружень у зонах контактної взаємодії окремих ЕШО та про значні рівні пружних переміщень.

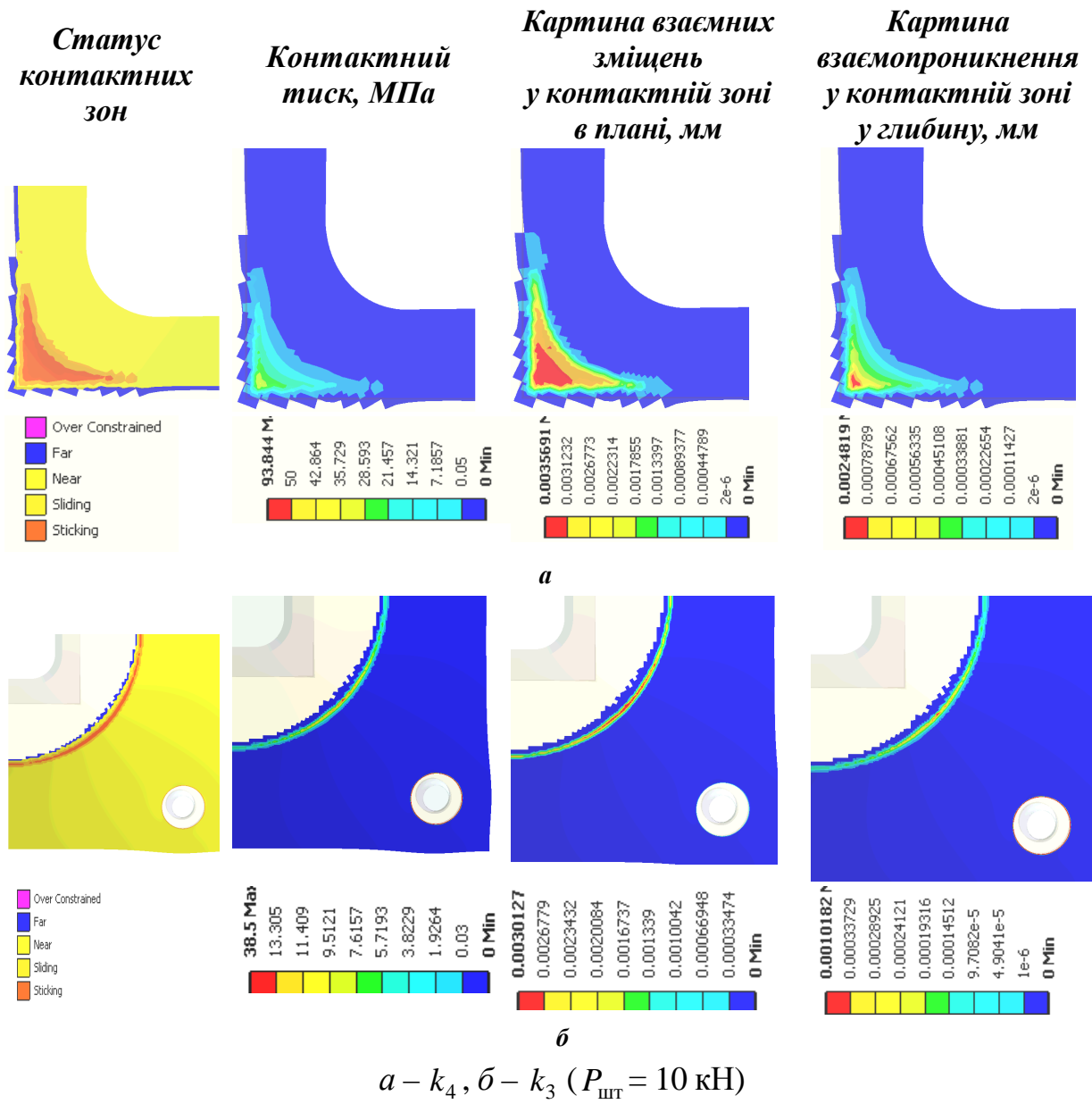
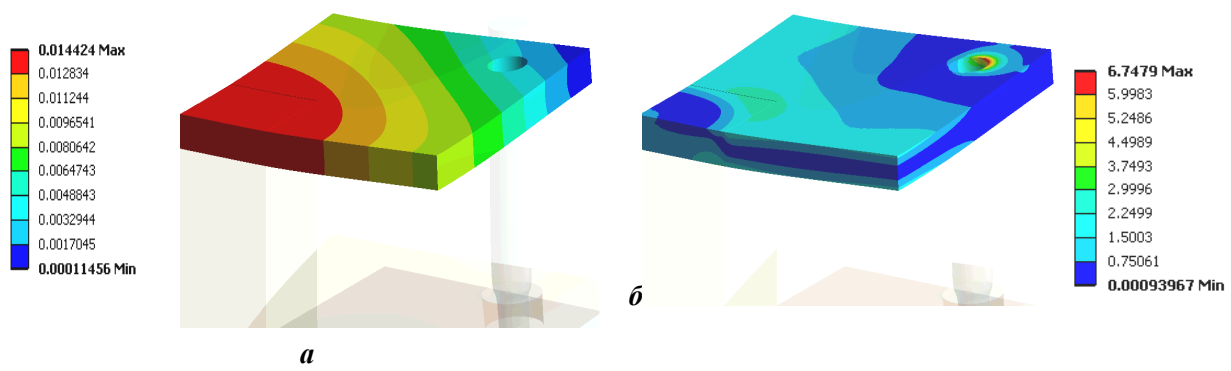
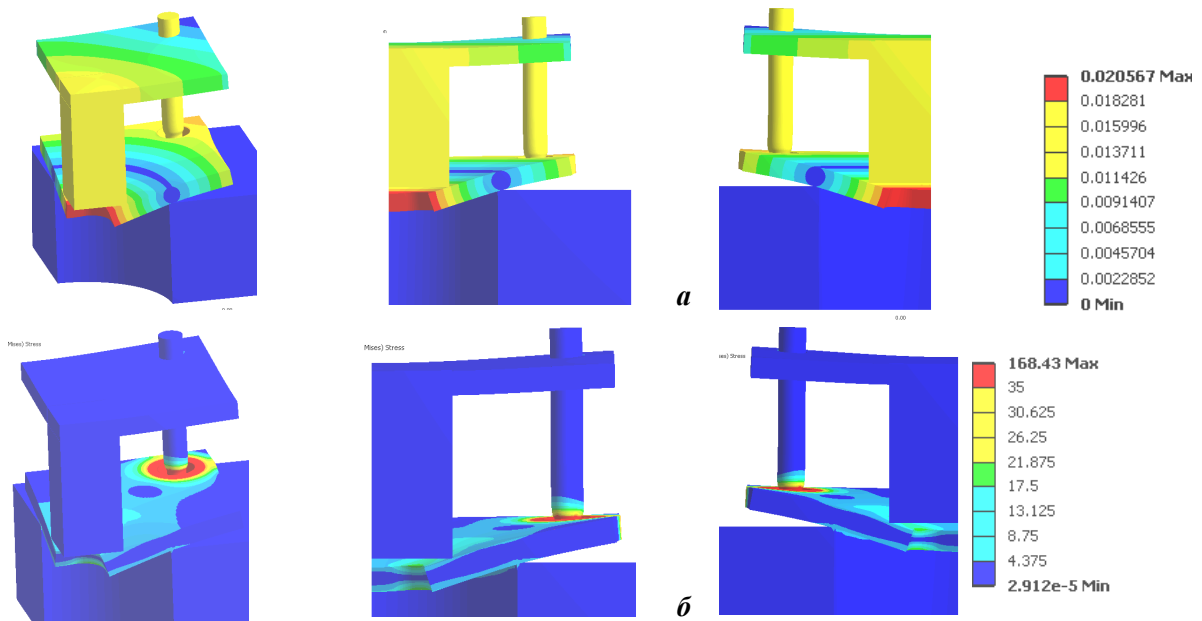


Рисунок 3.42 – Картини розподілу контактного тиску, МПа, у зонах

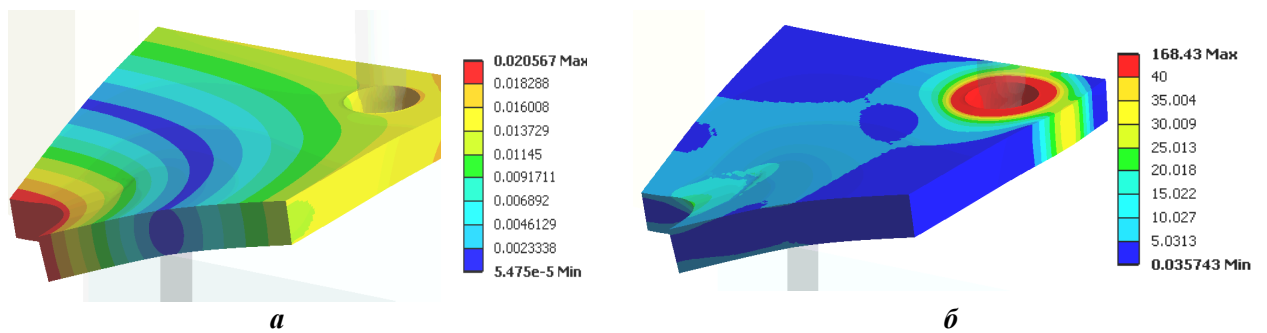


a – повні переміщення, мм, $б$ – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа

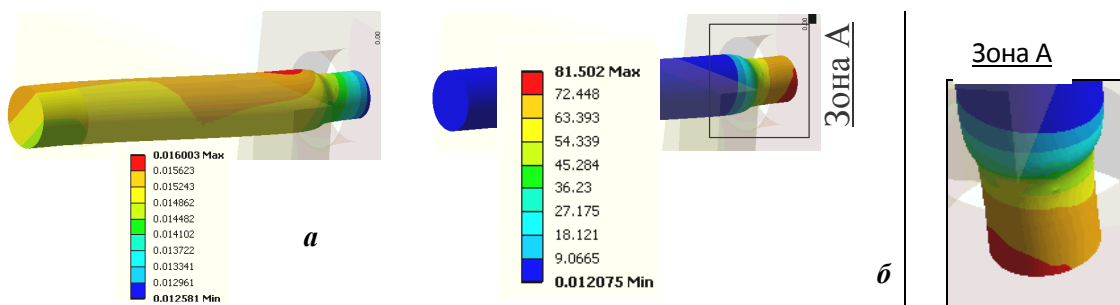
Рисунок 3.43 – Картини розподілу компонент НДС у верхній базовій плиті ($P_{шт} = 10 \text{ кН}$)



a – повні переміщення, мм, *б* – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
 Рисунок 3.44 – Картини розподілу компонент НДС ($P_{шт} = 10$ кН)



a – повні переміщення, мм, *б* – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
 Рисунок 3.45 – Картини розподілу компонент НДС у нижній базовій плиті ($P_{шт} = 10$ кН)



a – повні переміщення, мм, *б* – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
 Рисунок 3.46 – Картини розподілу компонент напружено-деформованого стану у напрямний колонці ($P_{шт} = 10$ кН)

Таким чином, можна зробити висновок, що якісну картину розподілу компонент напружено-деформованого стану можна проаналізувати за результата-

ми 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 складності створюваних моделей і точності одержаних результатів.

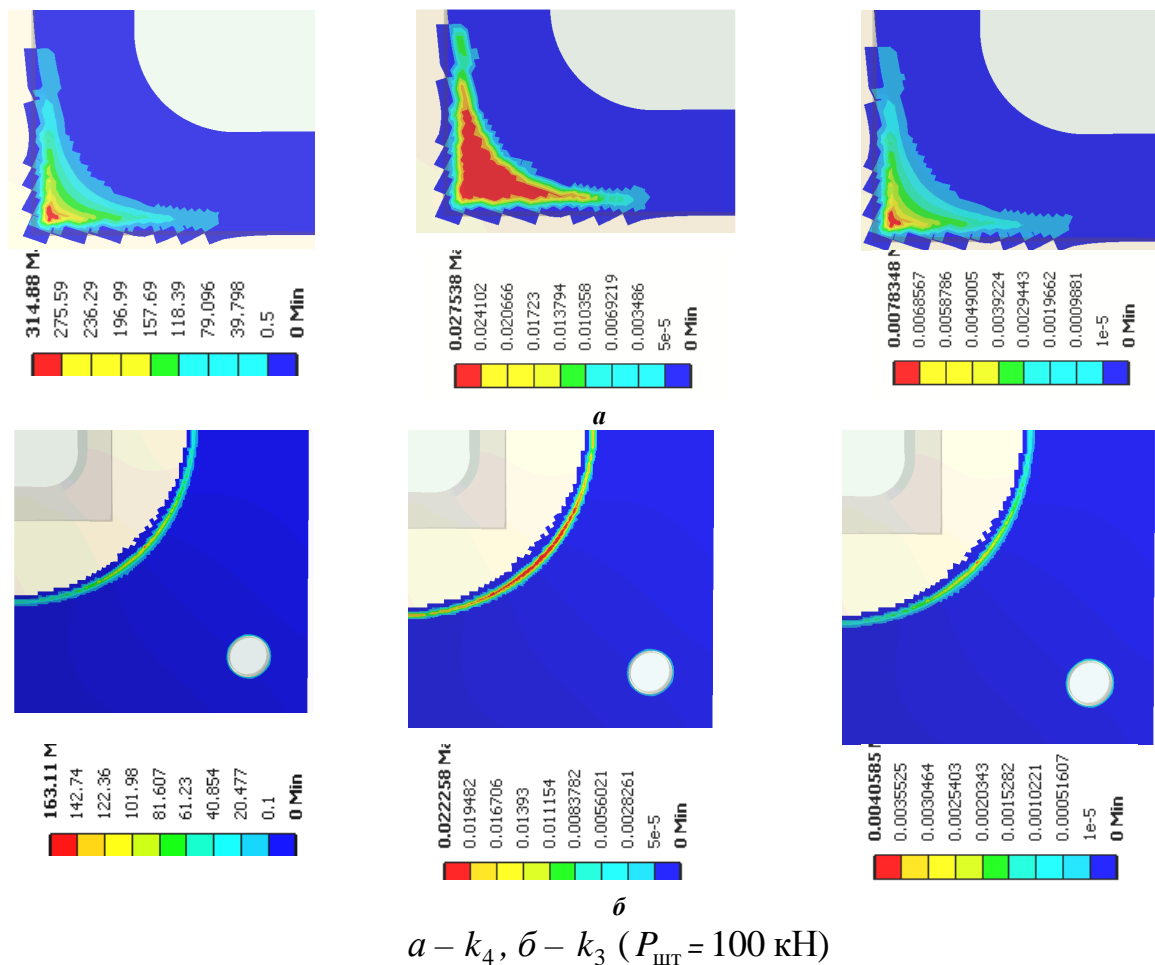


Рисунок 3.47 – Картини розподілу контактного тиску, МПа, у зонах

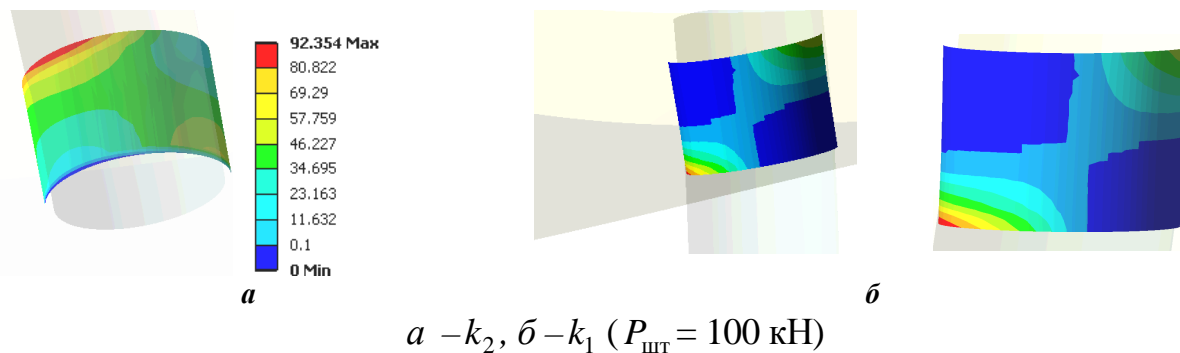
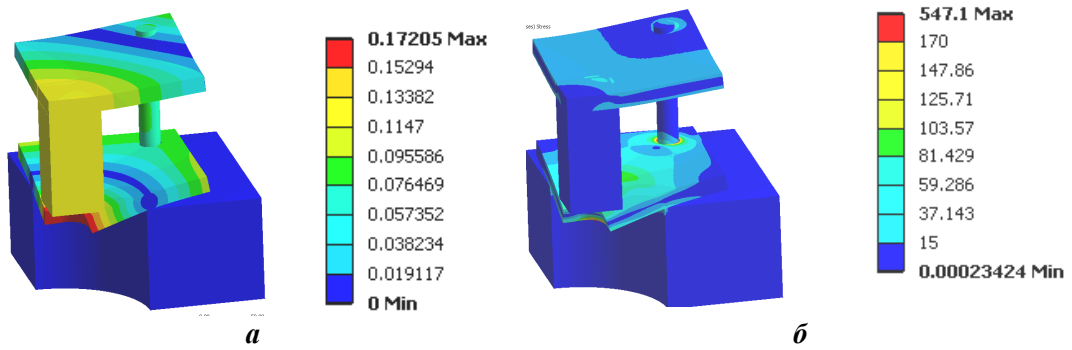
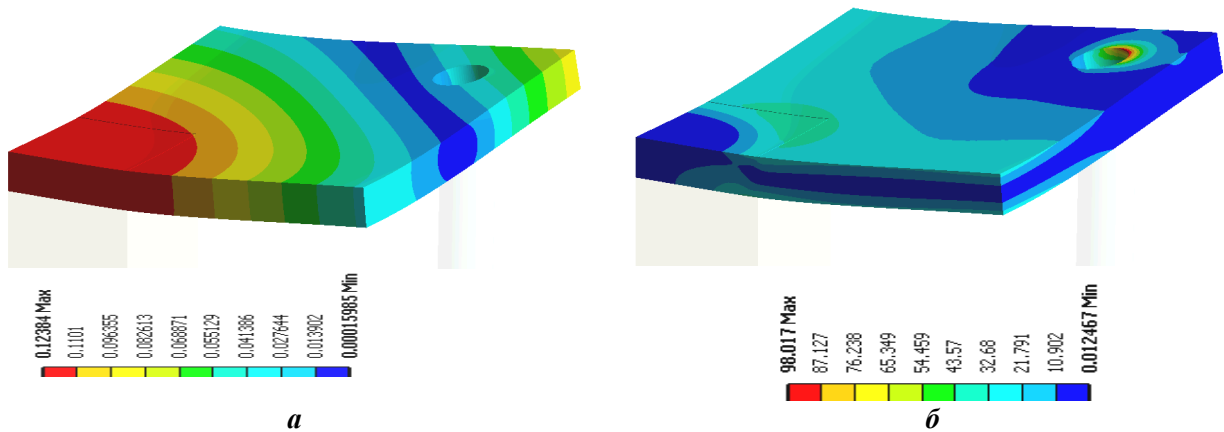


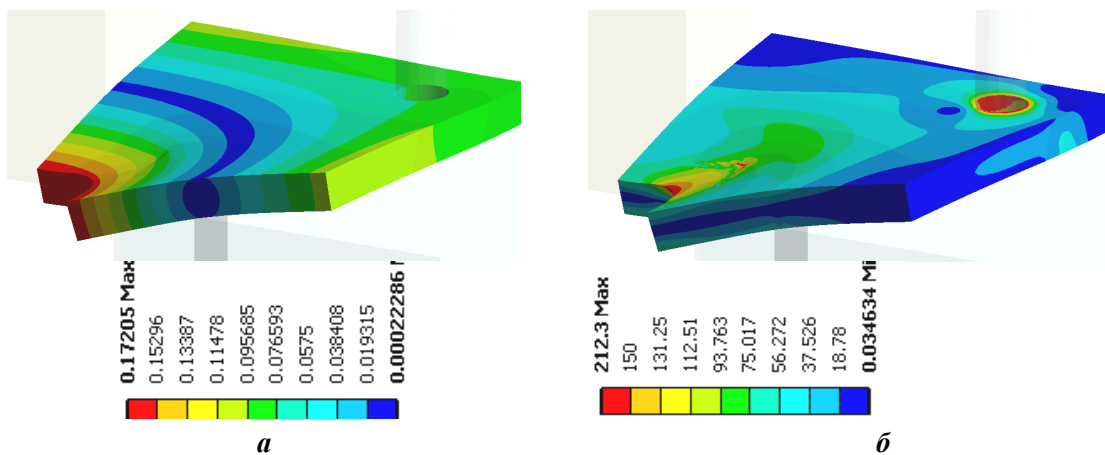
Рисунок 3.48 – Картини розподілу контактного тиску, МПа, у зонах



a – повні переміщення, мм, *б* – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
Рисунок 3.49 – Картини розподілу компонент НДС ($P_{шт} = 100$ кН)



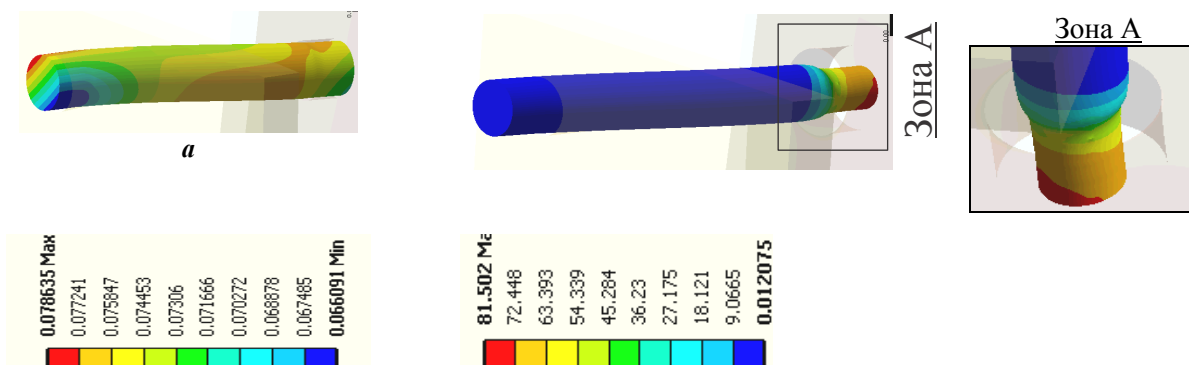
a – повні переміщення, мм, *б* – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
Рисунок 3.50 – Картини розподілу компонент НДС у верхній базовій плиті
($P_{шт} = 100$ кН)



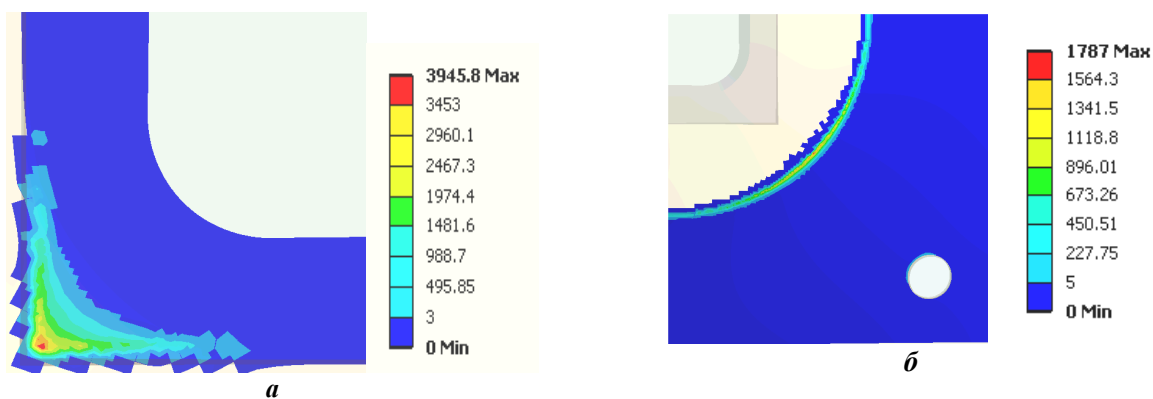
a – повні переміщення, мм, *б* – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
Рисунок 3.51 – Картини розподілу компонент НДС у нижній базовій плиті
($P_{шт} = 100$ кН)

Отримані результати дають основу для аналізу закономірностей розподілу контактного тиску елементів штампового оснащення. У монографії [130] зазначається, що для ряду механічних систем, в яких реалізується первинний

контакт на так званих "узгоджених" (тобто співпадаючих одна із одною) поверхнях, а також при можливості вигину, характерною є слабка залежність площі контактних зон від величини діючих сил. Крім того, контактний тиск є пропорційним діючим силам.

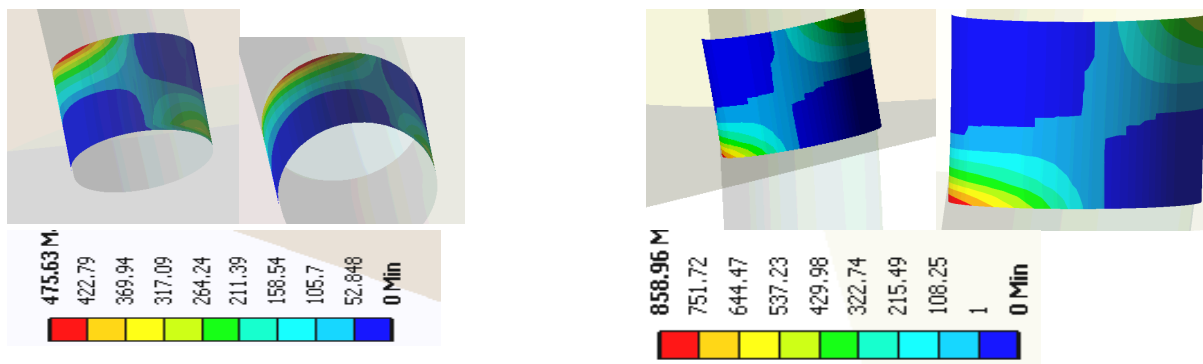


a – повні переміщення, мм, b – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
Рисунок 3.52 – Картини розподілу компонент напружено-деформованого стану у направляючій колонці ($P_{шт} = 100$ кН):



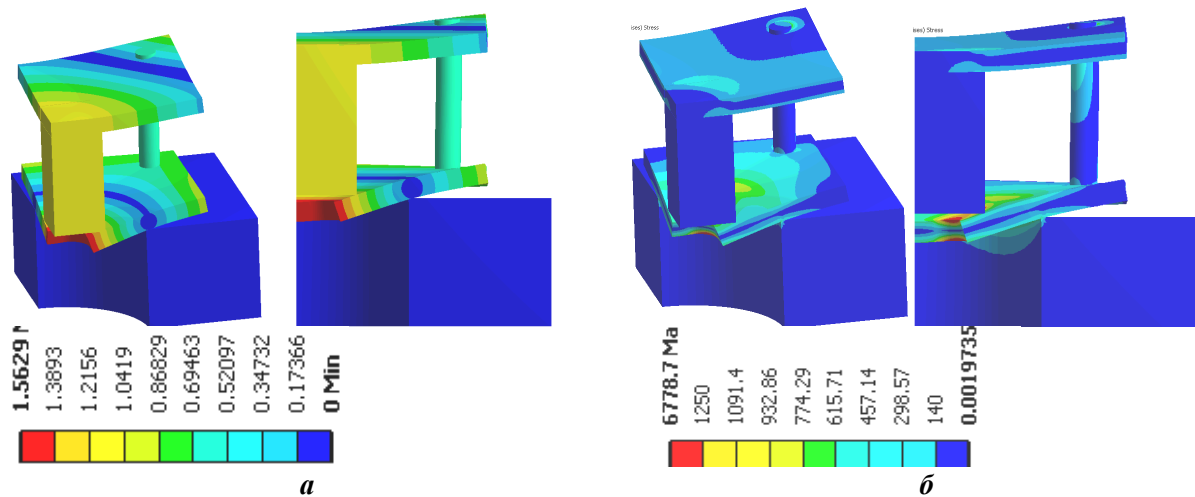
$a - k_4, b - k_3$

Рисунок 3.53 – Картини розподілу контактного тиску, МПа, у зонах ($P_{шт} = 1$ МН)

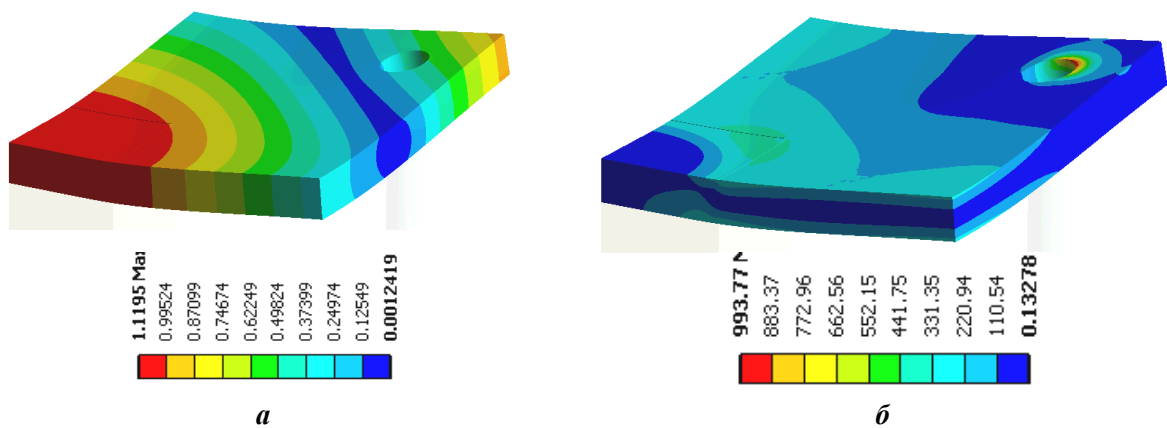


$a - k_2, b - k_1$

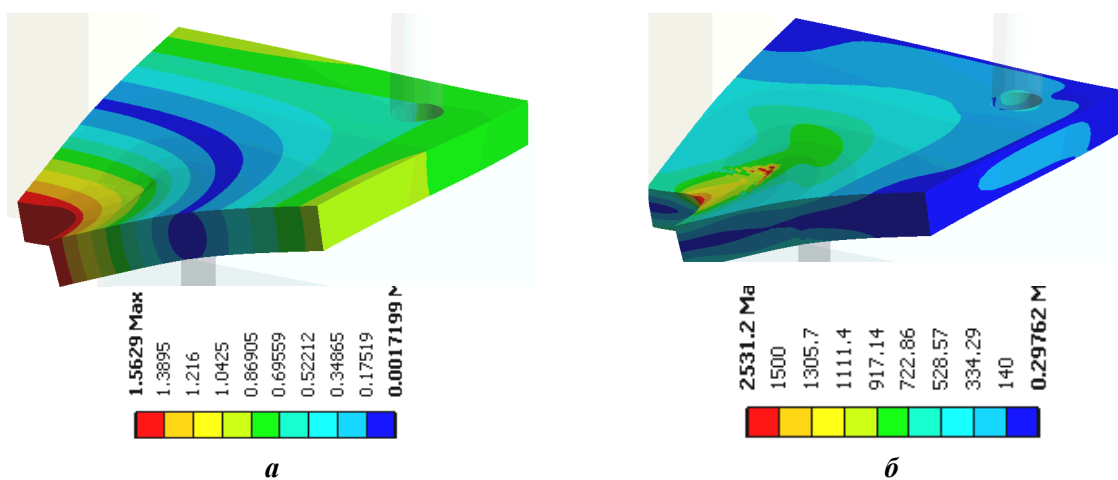
Рисунок 3.54 – Картини розподілу контактного тиску, МПа, у зонах ($P_{шт} = 1$ МН)



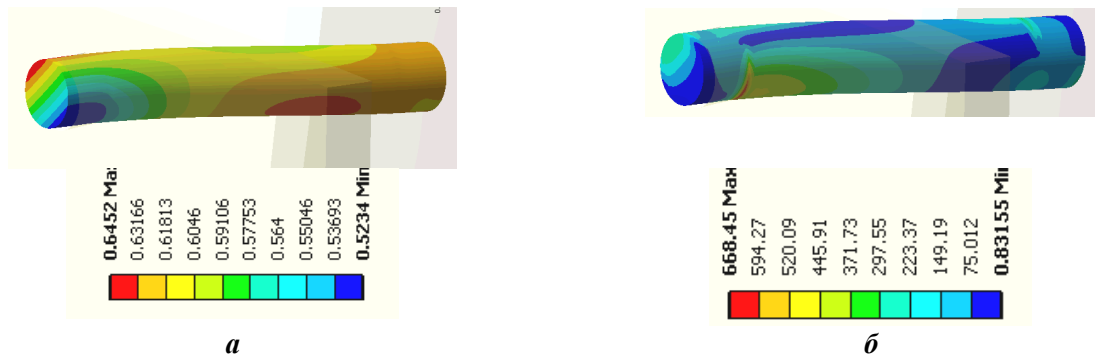
a – повні переміщення, мм, b – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
Рисунок 3.55 – Картини розподілу компонент НДС ($P_{шт} = 1$ МН):



a – повні переміщення, мм, b – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
Рисунок 3.56 – Картини розподілу компонент напружено-деформованого стану у верхній базовій плиті ($P_{шт} = 1$ МН)



a – повні переміщення, мм, b – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
Рисунок 3.57 – Картини розподілу компонент напружено-деформованого стану у нижній базовій плиті ($P_{шт} = 1$ МН)



a – повні переміщення, мм, b – еквівалентні напруження за Мізесом, МПа
Рисунок 3.58 – Картини розподілу компонент напружено-деформованого стану у напрямній колонці ($P_{шт} = 1$ МН)

Для перевірки виконання цих закономірностей для випадку множинного контакту елементів штампного оснащення було здійснено низку досліджень на прикладі розрахункової моделі (див. рис. 3.40) з варіюванням сили штампування $P_{шт}$. На рис. 3.59 наведено отримані результати. Видно, що із задовільною для практики точністю (похибка становить близько 2,5 %) зазначена властивість контактної тиску дотримується.

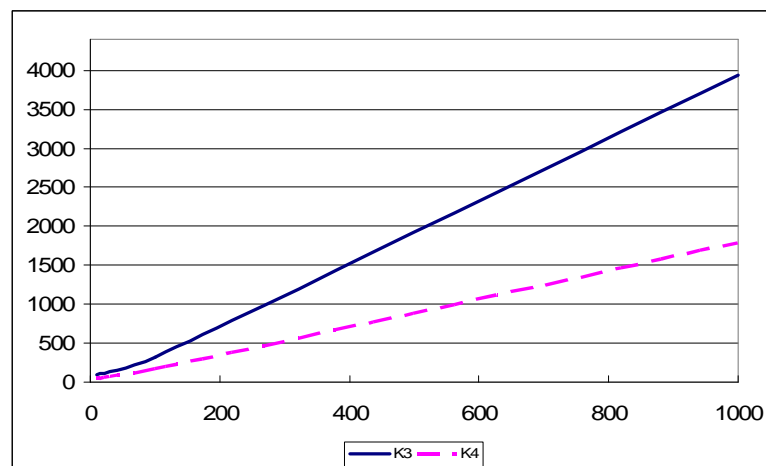


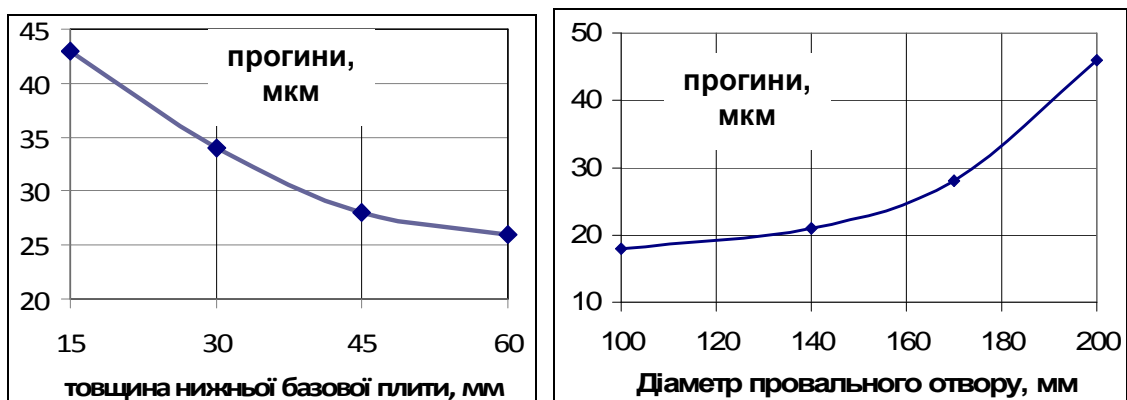
Рисунок 3.59 – Залежність максимального контактної тиску, МПа, у сполученнях від величини сили штампування, кН, k_4 , k_3

Це дуже важлива обставина, оскільки напружено-деформований стан за будь-якої діючої сили штампування можна отримати із результатів одини-

чного розрахунку при заданому $P_{шт}$ за лінійними залежностями.

Результати здійснених комплексних досліджень напружено-деформованого стану елементів розділових штампів (див. підрозд. 3.1–3.7) служать основою для визначення особливостей розподілу контактної тиску між елементами досліджених штампів, а також компонент їх НДС. Мова йде, зокрема, про незалежність контактних зон та законів розподілу контактної тиску, а також компонент напружено-деформованого стану від сили штампування. Крім того, величини контактної тиску та компонент НДС прямо пропорційні величині $P_{шт}$.

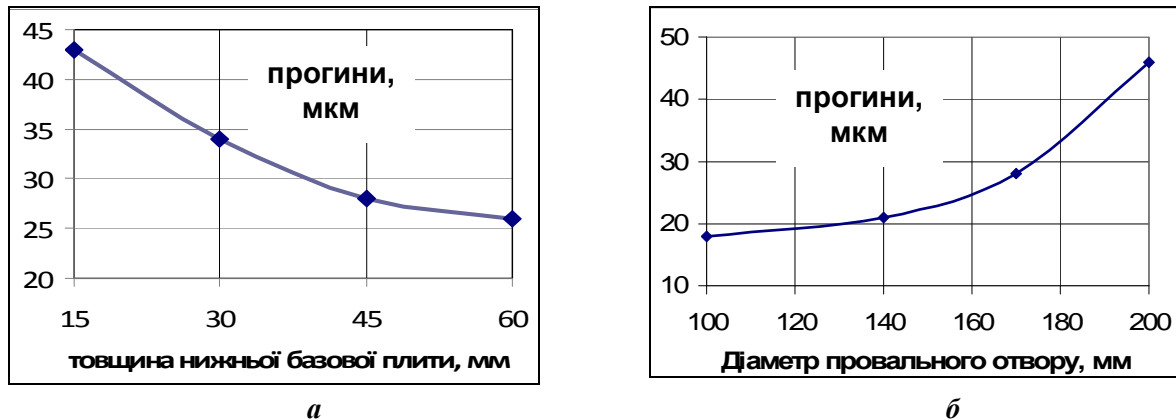
Разом із тим ці та інші якісні особливості при розв'язанні конкретних прикладних задач потребують кількісної ілюстрації. На рис. 3.60–3.73 наведені такі інтегральні залежності, одержані шляхом оброблення наведених вище у розділі результатів. На рис. 3.60–3.63, 3.65 – залежність прогинів та напружень від товщини нижньої плити та діаметра провального отвору. Видно, що проектно-технологічні чинники здійснюють істотний вплив на жорсткісні та міцнісні характеристики ЕШО.



а – при різних значеннях товщини нижньої базової плити h ($D = 170$ мм);
б – при варіюванні діаметру провального отвору ($h = 45$ мм)
 Рисунок 3.60 – Розподіл прогинів у досліджуваній системі "блок – базова плита – підштампова плита" (див. рис. 4.1)

Якщо брати до уваги абсолютні значення обмежень за прогинами базової плити і рівнем напружень, то її параметри слід обирати із умов конкретної задачі.

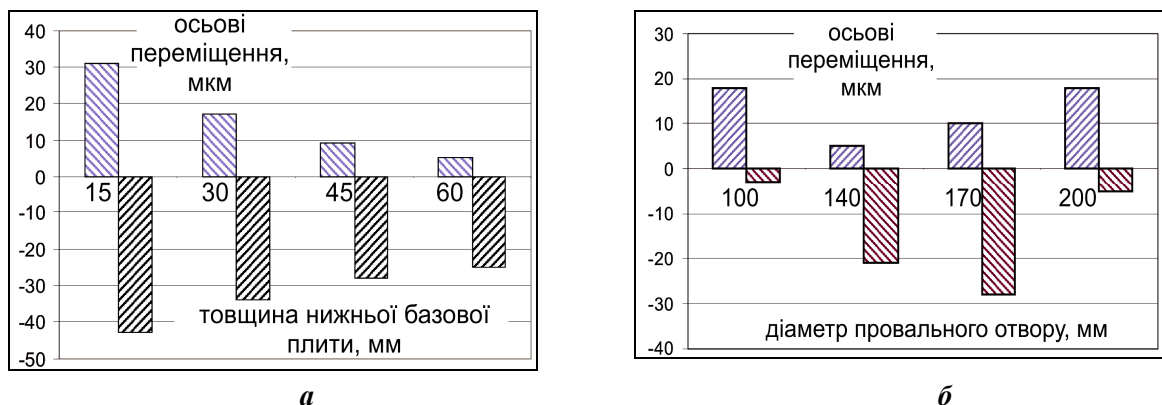
Так, рівень прогинів 30 мкм забезпечується за товщини плити $h = 45$ мм та діаметру провального отвору $D = 160$ мм. Рівень напружень до 100 МПа забезпечують $h = 45$ мм та $D = 175$ мм. Якщо ж виходити із чутливості жорсткісних та міцнісних характеристик ЕШО до зміни варійованих параметрів, то рекомендовані діапазони: за прогинами – $h \geq 45$ мм та $D \leq 160$ мм, а за напруженнями – $h \geq 45$ мм та $D \leq 175$ мм.



a – при різних значеннях товщини нижньої базової плити h ($D = 170$ мм);

б – при варіюванні діаметру провального отвору ($h = 45$ мм)

Рисунок 3.61 – Розподіл прогинів у базовій плиті (див. рис. 4.1)



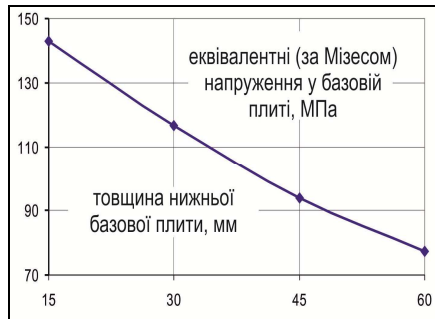
a – при різних значеннях товщини нижньої базової плити h ($D = 170$ мм);

б – при варіюванні діаметру провального отвору ($h = 45$ мм)

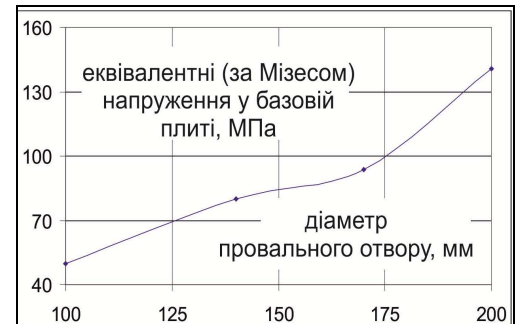
Рисунок 3.62 – Розподіл осьових переміщень у базовій плиті (див. рис. 4.1)

Як видно з наведених на рис. 3.64, 3.66 та 3.67 залежностей контактного тиску у зонах взаємодії нижньої базової плити зі змінним пакетом та підштамповою плитою преса від варійованих товщини плити та діаметра провального отвору, спостерігається хоч і суттєва, проте достатньо плавна та лінеаризовувана

залежність тиску від цих параметрів. Тиск зменшується зі зростанням діаметра провального отвору.



а

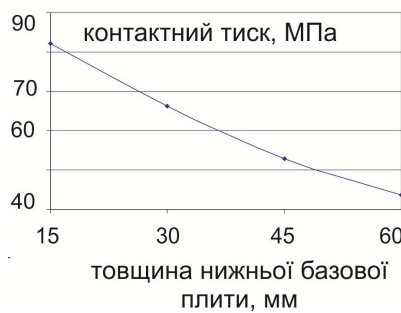


б

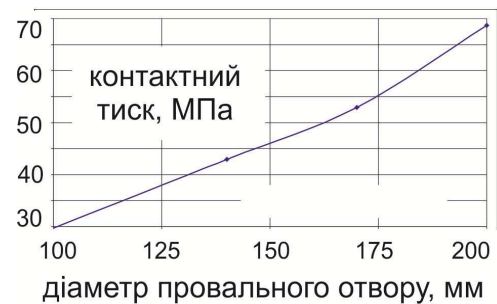
а – при різних значеннях товщини нижньої базової плити h ($D = 170$ мм);

б – при варіюванні діаметру провального отвору ($h = 45$ мм)

Рисунок 3.63 – Розподіл еквівалентних (за Мізесом) напружень у базовій плиті (див. рис. 4.1)



а



б

а – при різних значеннях товщини нижньої базової плити h ($D = 170$ мм);

б – при варіюванні діаметру провального отвору ($h = 45$ мм)

Рисунок 3.64 – Розподіл контактної тиску у зонах контактної взаємодії елементів досліджуваної системи "базова плита – підштампова плита" (див. рис. 4.1)



а

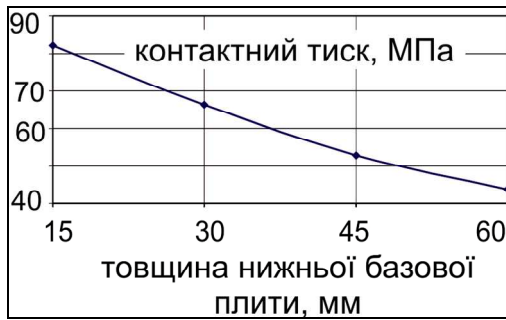
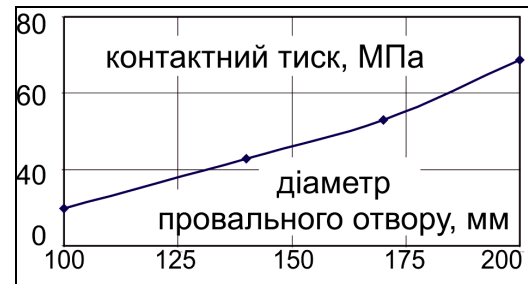


б

а – при різних значеннях товщини нижньої базової плити h ($D = 170$ мм);

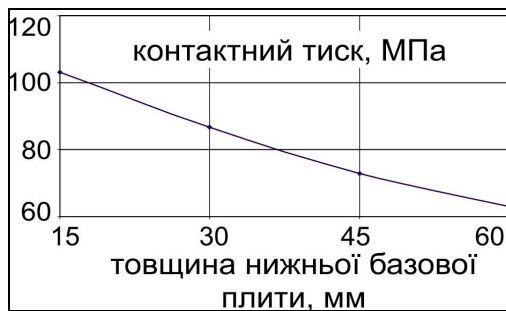
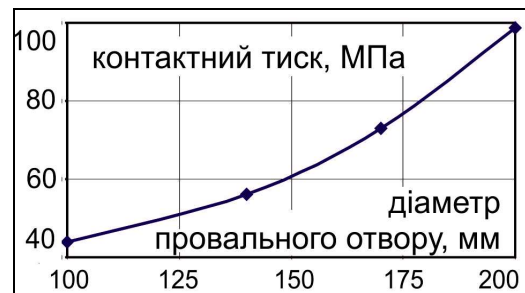
б – при варіюванні діаметру провального отвору

Рисунок 3.65 – Розподіл осьових нормальних напружень у базовій плиті (див. рис. 4.1)

*a**б*

a – при різних значеннях товщини нижньої базової плити h ($D = 170$ мм);
б – при варіюванні діаметру провального отвору ($h = 45$ мм)

Рисунок 3.66 – Розподіл контактної тиску у зонах контактної взаємодії елементів системи "базова плита – підштампова плита", що досліджується

*a**б*

a – при різних значеннях товщини нижньої базової плити h ($D = 170$ мм);
б – при варіюванні діаметру провального отвору ($h = 45$ мм)

Рисунок 3.67 – Розподіл контактної тиску у зонах контактної взаємодії елементів системи "пакет – базова плита", що досліджується

Залежності контрольованих міцнісних та жорсткісних характеристик елементів штампів від окремих параметрів можуть бути узагальнені на випадок залежностей від множини параметрів. На рис. 3.68–3.73 такі залежності наведені. Вони також дають можливість обґрунтовувати набори параметрів, які забезпечують ті чи інші міцнісні та жорсткісні характеристики штампів.

Разом з цим це дає підстави зробити висновки про те, що таким чином стає можливим заповнити спеціалізовані бази даних, які для тих чи інших розділових штампів дають змогу на етапі проектних розробок оперативно і точно розв'язувати два типи задач:

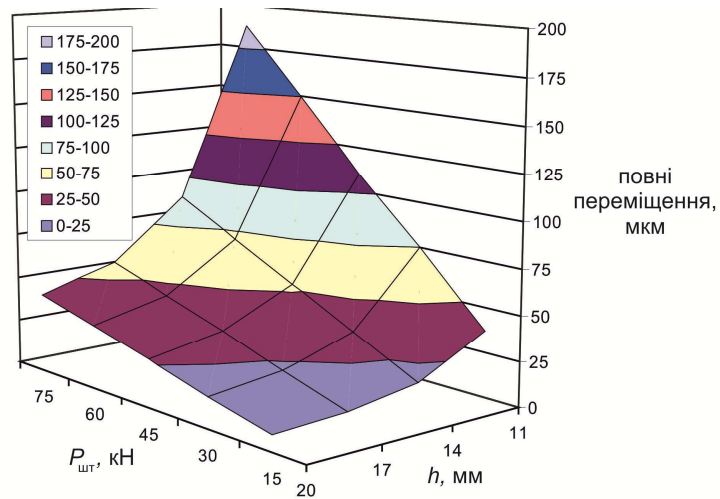


Рисунок 3.68 – Розподіл повних переміщень в системі "блок – базова плита – підштампова плита", що досліджується

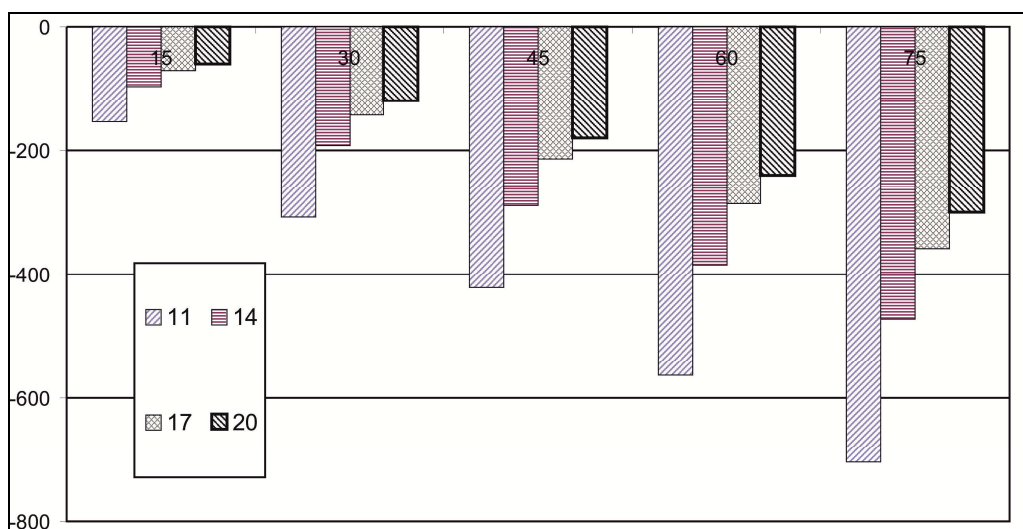
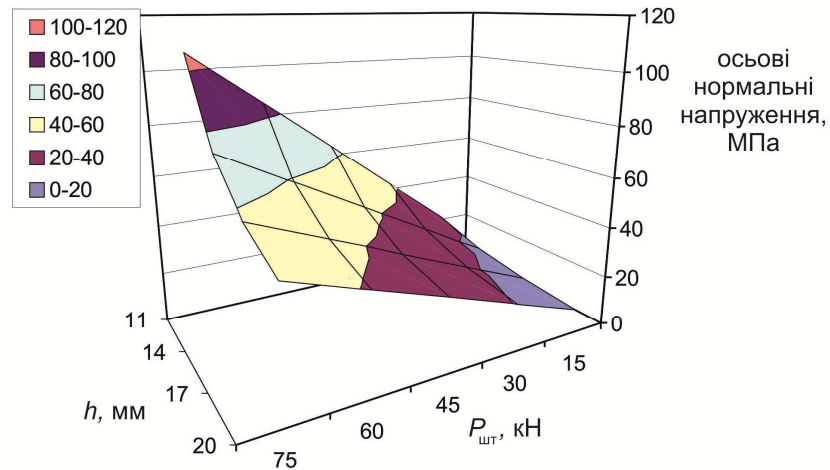


Рисунок 3.69 – Розподіл максимальних (за модулем) нормальних напружень у базовій плиті

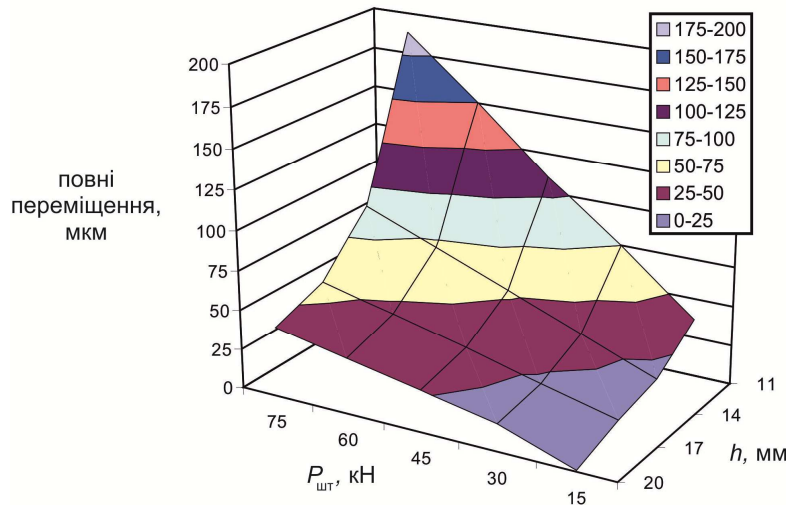


Рисунок 3.70 – Розподіл повних переміщень у базовій плиті

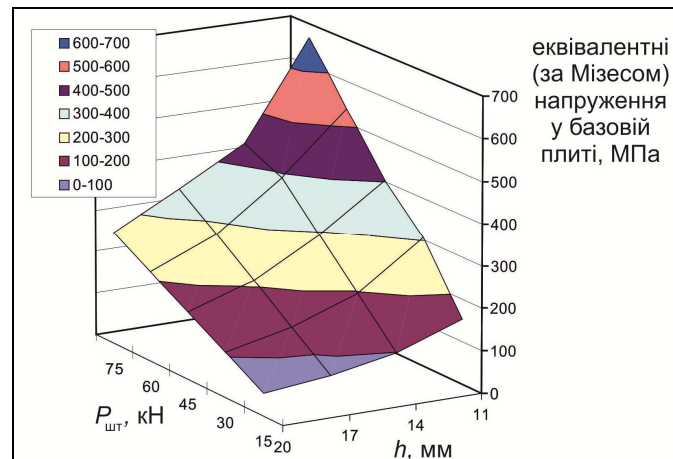


Рисунок 3.71 – Розподіл максимальних еквівалентних за Мізесом напружень у базовій плиті

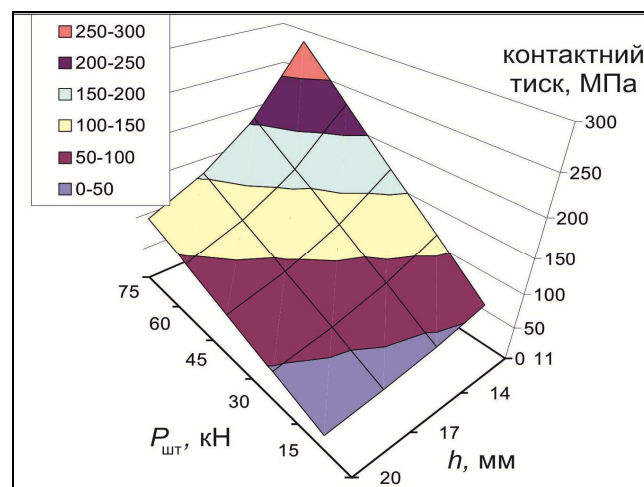


Рисунок 3.72 – Розподіл контактної тиску у зонах контактної взаємодії елементів системи "базова плита – підштампова плита", що досліджується

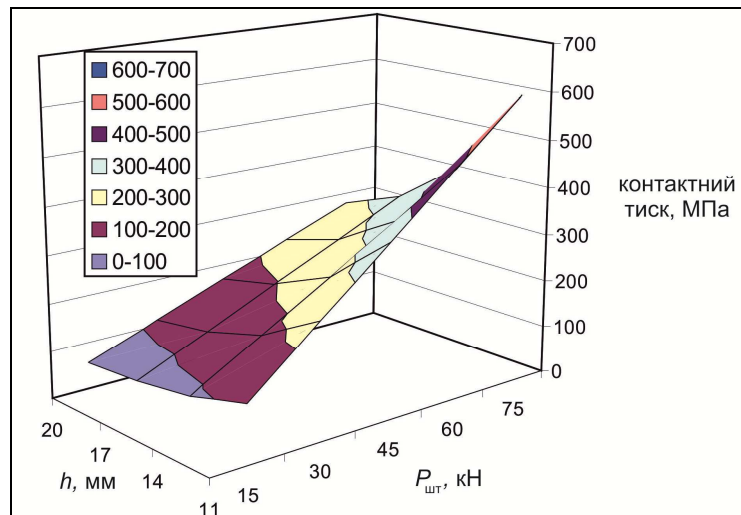


Рисунок 3.73 – Розподіл контактного тиску у зонах контактної взаємодії елементів системи "пакет – базова плита", що досліджується,

- визначати міцнісні та жорсткісні характеристики елементів штампів при заданому наборі проектно-технологічних параметрів;
- обґрунтовувати такий набір проектно-технологічних параметрів, який забезпечує необхідний рівень міцності, стійкості, жорсткості та точності розділових штампів холодного листового штампування.

У результаті розроблено загальний підхід, методи, моделі та засоби проектних досліджень елементів штампового оснащення.

Висновки за розділом 3

У розділі 3 описано комплексну модель напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення. Отримані результати дають можливість обґрунтувати наступні висновки.

1. Для забезпечення можливості варіативності геометричних і чисельних моделей елементів штампового оснащення інтегрований і адаптований підхід з застосуванням методу узагальненого параметричного моделювання. Цим самим забезпечується, на відміну від традиційних підходів, безконфлік-

тна побудова моделей елементів штампового оснащення в широкому діапазоні варіювання їхніх проектно-технологічних параметрів.

2. На основі розв'язання задачі про визначення спектра власних частот коливань елементів штампового оснащення встановлено, що в силу їх високих значень при визначенні напружено-деформованого стану припустимо у багатьох випадках використовувати квазістатичний підхід, нехтуючи динамічними ефектами. Зокрема, з похибкою на рівні до 2,5 % підтверджена справедливість лінійної залежності компонент напружено-деформованого стану елементів розділових штампів від сил штампування, незважаючи на нелінійність задачі про їх контактну взаємодію.

3. Розроблені у розділі 2 підходи до параметризації та до врахування множинної контактної взаємодії при формуванні математичної та чисельної моделей напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення реалізовані на прикладі розділових штампів для вирубки-пробивання. Цими підходами забезпечується більш високий, порівняно із традиційними методиками розрахунку, рівень адекватності моделей, точності отримуваних результатів та обґрунтованості розроблюваних на їх основі рекомендацій.. Для обґрунтування проектно-технологічних рішень елементів штампового оснащення запропонований підхід з застосуванням поповнюваної бази даних розрахунків напружено-деформованого стану ЕШО. На відміну від спрощених розрахункових моделей або прямого багаторазового розв'язання задач у повній постановці, пропонований підхід забезпечує і точність, і оперативність розв'язання цих задач.

4. На прикладі блоку розділового штампа здійснено дослідження впливу низки конструктивних параметрів на НДС елементів штампового оснащення. Зокрема, проаналізовано вплив товщини базової плити, її розмірів у плані, діаметра провального отвору на характеристики міцності та жорсткості. Установлено, що додавання матеріалу призводить до підвищення міцності та жорсткісних характеристик базових плит, однак, з деякого значення, подальше нарощення конс-

трукції стає малоефективним. Навпаки, при зниженні маси елементів штампового оснащення у певний момент настає різке погіршення характеристики міцності та жорсткості. Це дає підставу для висновків про те, що в зоні раціональних проектно-технологічних рішень характеристики міцності та жорсткості, а, значить, стійкості та точності виконання технологічних операцій, не мають занадто різко змінюватися при зміні проектно-технологічних параметрів, а також бути занадто чутливими до такого варіювання. Так, для дослідження розділових штампів 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 варіюваних 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.

5. Як альтернативне технологічне рішення при створенні переналагоджуваних розділових штампів розглянута технологічна операція закріплення напрямних колонок за допомогою твердіючих компаундів. Це дає можливість різкого прискорення і здешевлення виготовлення штампів. При цьому виявлено, що в шарі кріплення реалізується надзвичайно складний неоднорідний напружено-деформований стан. Таким чином, застосування спрощених моделей для розрахунку несучої здатності та податливості колонок у таких сполученнях призводить до неприпустимих похибок (у 1,8-рази), і необхідно здійснювати дослідження НДС у повній просторовій постановці задачі у цих зонах.

6. На прикладі дослідження НДС елементів розділових штампів з використанням моделей, які об'єднують базові плити (нижню і верхню), напрямні колонки та змінний пакет, а також підштапову плиту преса, продемонстровані, по-перше, можливості створеного СПМК, і, по-друге, вплив урахування множинного контакту на напружено-деформований стан ЕШО. При цьому, зокрема, виявлено, що у разі множинного контакту елементів штампового оснащення за узгодженими поверхнями так само, як і в парному, площадки

контакту не залежать від $P_{шт}$, а тиск залежно від сили штампування змінюються прямо пропорційно. Таким же чином змінюються і компоненти НДС елементів штампного оснащення.

На завершення можна зробити висновок про працездатність, точність і оперативність створеного у розділі інструменту дослідження та обґрунтування проектно-технологічних рішень елементів штампного оснащення за критеріями міцності, жорсткості, стійкості та точності виконання технологічних операцій штампування.

Розроблена математична модель і створений на її основі спеціалізований програмно-модельний комплекс були використані для розв'язання низки задач дослідження напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення із урахуванням множинної контактної взаємодії.

Крім підтвердження близького лінійного характеру залежності максимального контактного тиску у сполученнях базової плити зі змінним пакетом та підштамповою плитою преса, наведені графічні залежності (див. рис. 3.59) дають можливість обґрунтувати конкретні рекомендації щодо вибору проектних технологічних параметрів елементів РШ. Так, допускаючи рівень тиску до 1500 МПа, можна обирати граничну силу штампування на рівні до 400 кН (для розглянутого випадку). При цьому тиск у спряженні базової плити з пакетом удвічі вищий, ніж – з підштамповою плитою преса. Саме за значеннями контактного тиску у цій зоні здійснюються висновки щодо працездатності штампа та розробки рекомендацій з обґрунтування проектно-технологічних рішень спроектованих штампів.

Результати розділу висвітлені у роботах [4, 6–8, 10–17, 19, 20, 22–29].

4 РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ

4.1 Розрахунково-експериментальні дослідження напружено-деформованого стану базових плит штампів із урахуванням контактної взаємодії

При проведенні розрахунково-експериментального дослідження напружено-деформованого стану базових плит штампів із урахуванням контактної взаємодії для порівняння чисельно й експериментально отриманих результатів були частково залучені дані лабораторних і виробничих випробувань напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення, описані в роботах [30, 59, 65, 105, 148, 149, 160]. Це пояснюється тим, що в цій роботі наведено великий матеріал експериментальної інформації, проте база отриманих і використаних для порівняння чисельних результатів недостатньо повна, оскільки в основному спирається на результати моделювання із застосуванням пластинчастих елементів. У той же час у цій роботі на сьогоднішній день отримані та описані результати досліджень у більш точній та повній просторовій постановці.

У зв'язку з цим природно було б порівнювати згадані експериментальні дані з більш повними числовими результатами, отриманими із залученням розроблених і описаних у розд. 2, 3 підходу, методів і моделей.

На рис. 4.1 наведена схема системи "блок – базова плита – підштампова плита", а в табл. 4.1 наведено варіанти поєднань конструктивних і експлуатаційних параметрів схем, а у табл. 4.2–4.8 (та у додатку В – у повному обсязі) – результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану базових плит у вигляді просторових розподілів напруження, переміщень, кон-

тактного тиску.

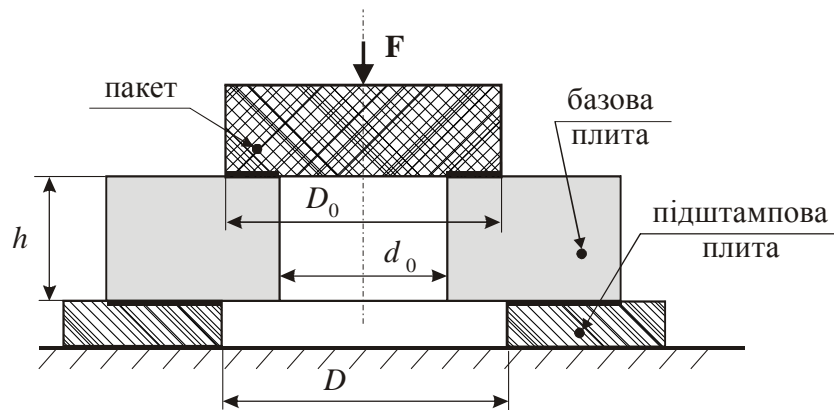


Рисунок 4.1 – Система "блок – базова плита – підштампова плита"

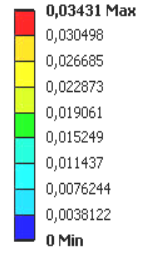
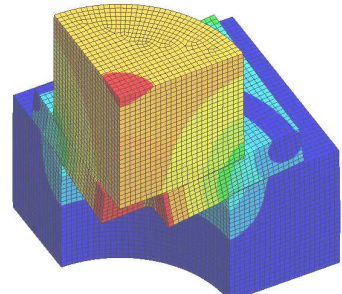
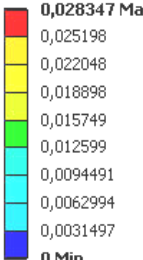
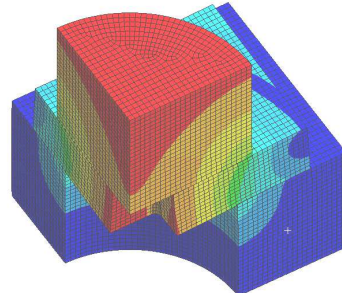
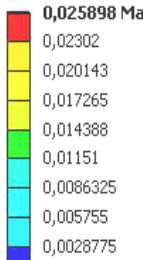
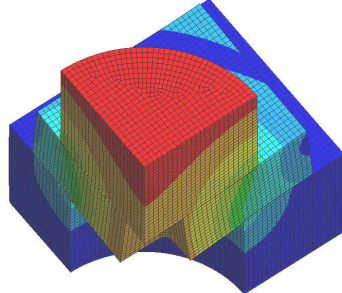
Таблиця 4.1 – Варіанти сполучень параметрів розрахункових схем (див. рис. 4.1)

№ варіанта	D (мм)	h (мм)	F (кН)	№ варіанта	D (мм)	h (мм)	F (кН)
1	170	15	450	5	100	45	450
2		30		6	140		
3		45		7	170		
4		60		8	200		

Таблиця 4.2 – Розподіл повних переміщень у досліджуваній системі "блок – базова плита – підштампова плита" при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

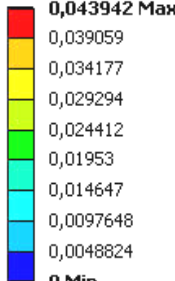
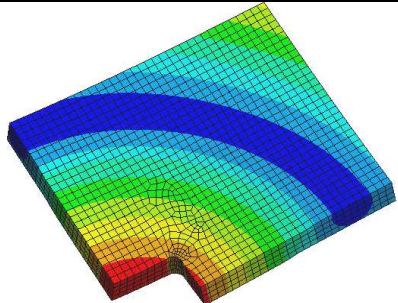
D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
170	15	0,043	0,043942 Max 0,039059 0,034177 0,029294 0,024412 0,01953 0,014647 0,0097648 0,0048824 0 Min	

Закінчення табл. 4.2

D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
170	30	0,034		
	45	0,0283		
	60	0,0258		

Видно, що представлені результати відрізняються незначною мірою, похибка не перевищує 10%, у той же час як похибка числових результатів, описаних в [30], складає 20%.

Таблиця 4.3 – Розподіл повних переміщень у базовій плиті при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
	15	0,043		

Закінчення табл. 4.3

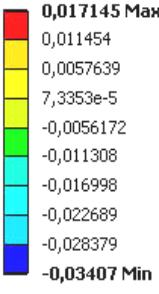
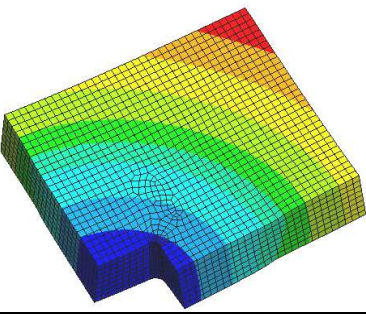
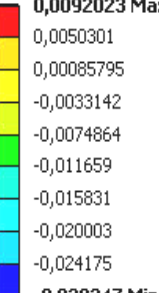
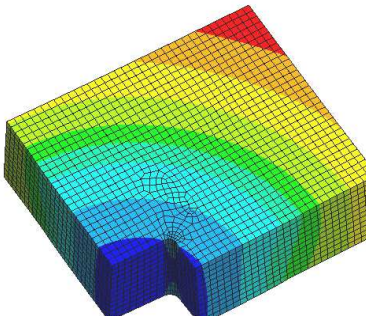
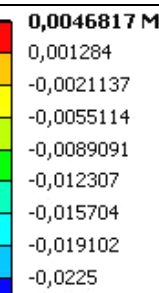
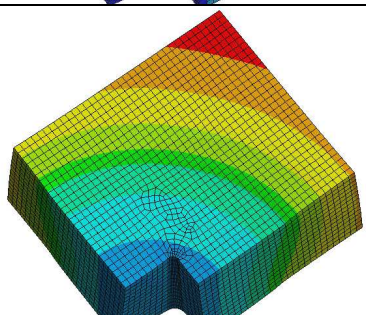
D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
170	30	0,034		
	45	0,0283		
	60	0,0258		

Крім того, спостерігається характерна локалізація контактних зон. Ці зони розташовані на зовнішній периферії внутрішніх (у плані) елементів штампового оснащення.

Таблиця 4.4 – Розподіл осьових переміщень у базовій плиті при різних значеннях товщини нижньої базової плити h при $D = 170$ мм (див. рис. 4.1)

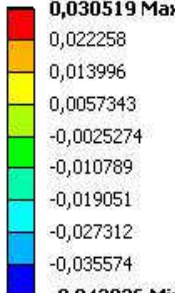
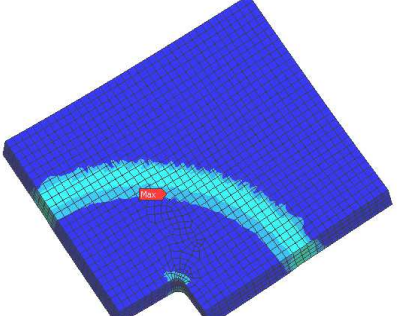
h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу осьових переміщень
15	0,031 -0,043		

Закінчення табл. 4.4

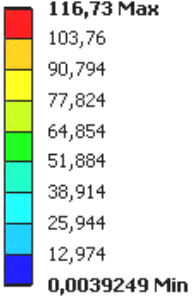
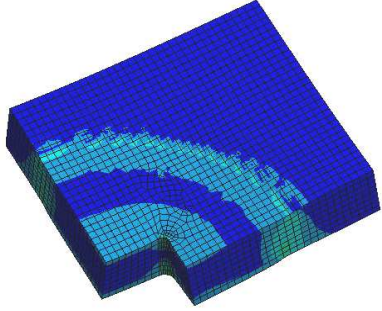
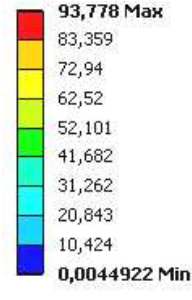
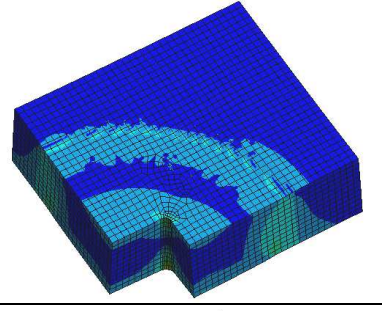
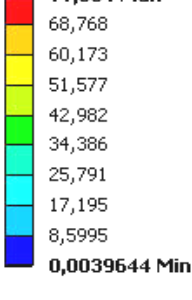
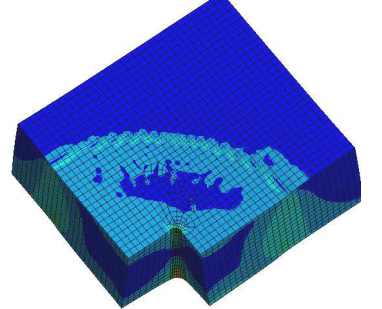
h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу осьових переміщень
30	0,0171; -0,03407	 <p>0,017145 Max 0,011454 0,0057639 7,3353e-5 -0,0056172 -0,011308 -0,016998 -0,022689 -0,028379 -0,03407 Min</p>	
45	0,0092; -0,0283	 <p>0,0092023 Max 0,0050301 0,00085795 -0,0033142 -0,0074864 -0,011659 -0,015831 -0,020003 -0,024175 -0,028347 Min</p>	
60	0,0046; -0,025мм	 <p>0,0046817 Max 0,001284 -0,0021137 -0,0055114 -0,0089091 -0,012307 -0,015704 -0,019102 -0,0225 -0,025898 Min</p>	

Тиск концентрується ближче до зовнішнього контура області контакту.

Таблиця 4.5 – Розподіл еквівалентних (за Мізесом) напружень у базовій плиті при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

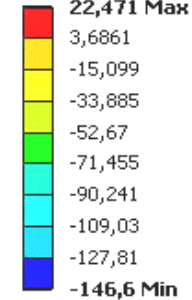
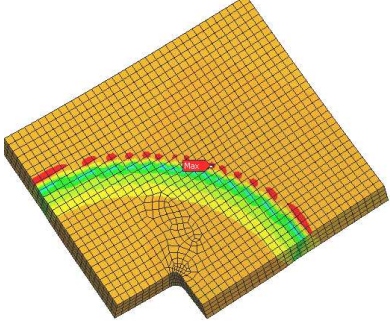
D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу еквівалентних за Мізесом напружень
170	15	142,9	 <p>0,030519 Max 0,022258 0,013996 0,0057343 -0,0025274 -0,010789 -0,019051 -0,027312 -0,035574 -0,043836 Min</p>	

Закінчення табл. 4.5

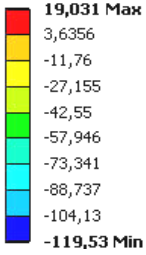
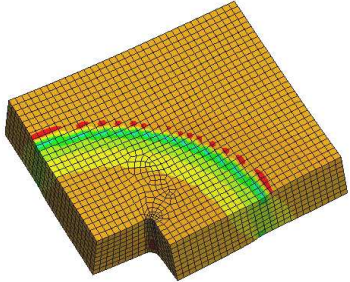
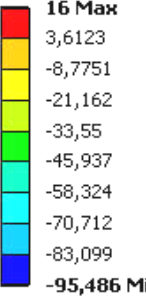
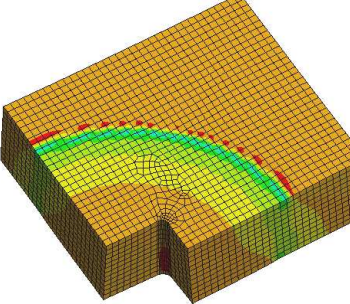
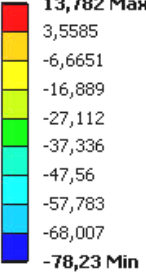
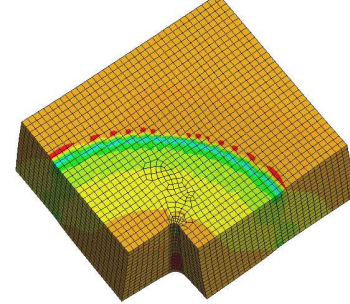
D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу еквівалентних за Мізесом напружень перемі- щень
170	30	116,73		
	45	93,77		
	60	77,364		

Крім того, характерим є певний розподіл контактного тиску.

Таблиця 4.6 – Розподіл осьових нормальних напружень у базовій плиті при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

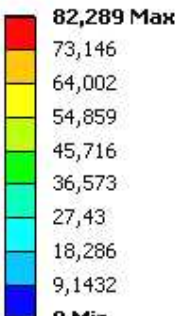
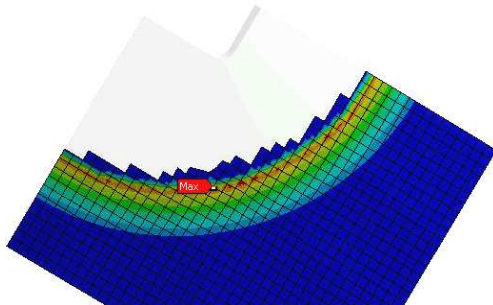
D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу осьових нормальних напружень
170	15	22,471 ; -146,6		

Закінчення табл. 4.6

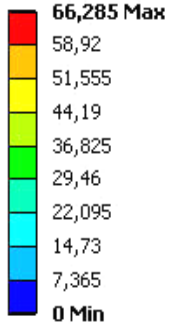
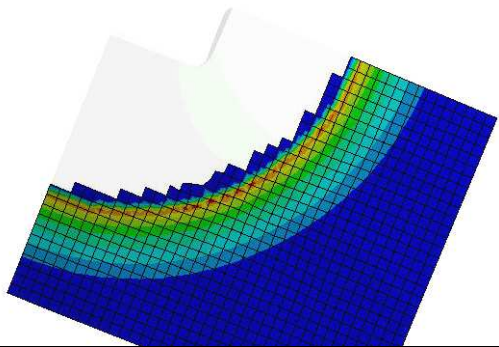
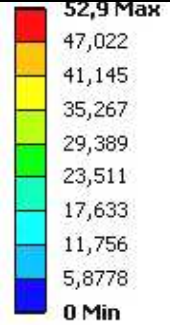
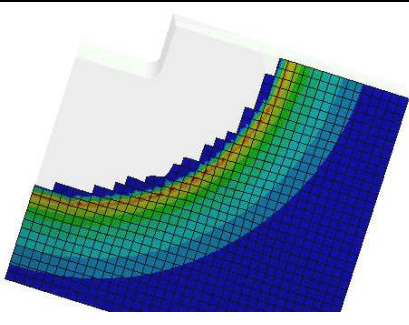
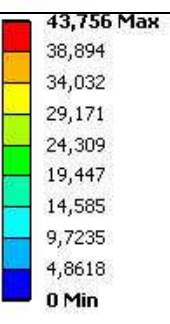
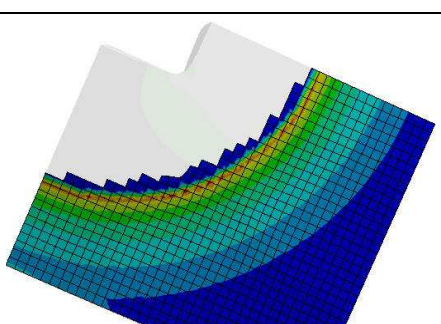
D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу осевих нормальних напружень
170	30	19,031; - 119,53		
	45	16 ; -95,48		
	60	13,782 ; -78,23		

Також характерним є ще вища концентрація тиску у кутових точках контара області контакта.

Таблиця 4.7 – Розподіл контактного тиску у зонах контактної взаємодії елементів досліджуваної системи "базова плита – підштампова плита" при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
170	15	82,2		

Закінчення табл. 4.7

D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
170	30	66,2		
	45	52,9		
	60	43,75		

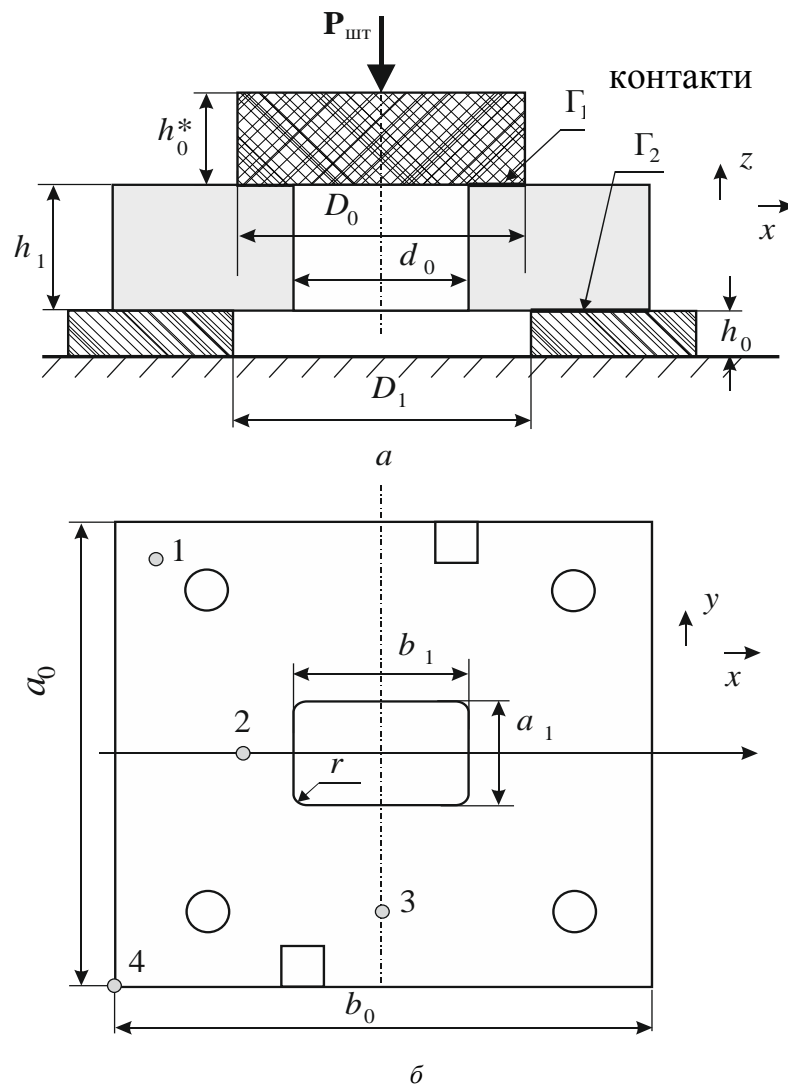
У верхній частині рис. 4.2 наведена розрахункова схема для дослідження напружено-деформованого стану нижньої базової плити універсально-переналагоджуваного штампу (УПШ) третього типорозміру [30], у нижній – схема установки датчиків переміщень (у ході експериментів). На рис. 4.3 представлена розрахункова схема для дослідження розподілу контактного тиску в сполученні базової плити штампа з підкладною плитою преса, а в табл. 4.9 – варіанти параметрів, для яких проводилися експерименти та розрахунки. Для проведення чисельного моделювання були прийняті такі значення розрахункових параметрів: $P_{шт}$ варіювалося в інтервалі 15, 30, 45, 60 і 75 кН, $D_0 = \varnothing 40$ мм, $h_0 = 26$ мм, $d_0 = \varnothing 30$ мм, $D_1 = \varnothing 70$ мм, $D_2 = \varnothing 120$ мм.

Таблиця 4.8 – Розподіл контактної тиску у зонах контактної взаємодії елементів досліджуваної системи "пакет – базова плита" при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
170	15	103,09	<p>103,09 Max 91,637 80,182 68,727 57,273 45,818 34,364 22,909 11,455 0 Min</p>	
	30	86,67	<p>86,67 Max 77,047 67,416 57,785 48,154 38,524 28,893 19,262 9,6309 0 Min</p>	
	45	72,9	<p>72,909 Max 64,808 56,707 48,606 40,505 32,404 24,303 16,202 8,101 0 Min</p>	
	60	63,07	<p>63,079 Max 56,07 49,061 42,052 35,044 28,035 21,026 14,017 7,0087 0 Min</p>	

У роботі [30] описаний комплекс експериментальних досліджень НДС базової плити цього блоку, що включає фіксацію методами голографічної інтерферометрії, тензометрії та вимірювань переміщень за допомогою датчиків

(індикаторів) годинникового типу (див. розд. 1). Залучалася наступна апаратура: голографічна установка СІН-1 з гелій-неоновим лазером ЛГН-215, фотопластинки ПФГ-3, гідравлічний прес П-125, система тензометрична СІИТ-3, тензорезистори типу КФ-5, індикатори переміщень годинникового типу з ціною поділки 1 і 10 мкм.



a – розрахункова схема для дослідження напружено-деформованого стану;
 $б$ – схема установки датчиків переміщень; \odot_i – місця розташування датчиків

Рисунок 4.2 – Нижня базова плита УПШ третього типорозміру

Для отримання розподілу контактної тиску був використаний метод контактних відбитків. Реєструюче середовище – пергаментний папір товщиною 0,06 мм. При контактному впливі на папір його світлопропускання змі-

нюється, що можна зафіксувати за допомогою фотоелемента, який сприймає світловий промінь, що проходить через папір у різних точках поверхні. При таруванні міліамперметра, приєднаного до фотоелемента, виходить вимірний прилад, описаний у роботі [31]. Він дає можливість сканування контактних відбитків. Із застосуванням цього приладу досліджувався макет базової плити, установлений на випробувальній машині Р-10. Таким чином, на виході отримано вагомий обсяг достатньо точної та детальної інформації, одержуваної експериментально.

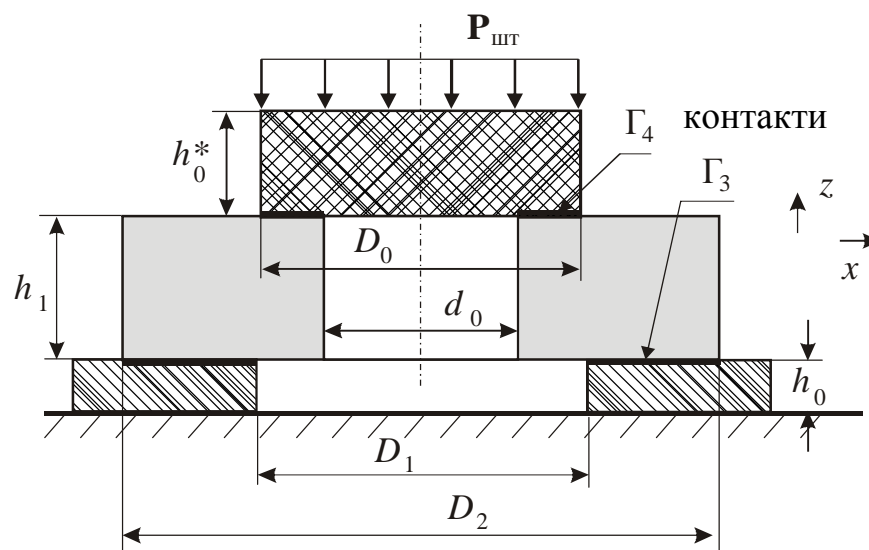


Рисунок 4.3 – Розрахункова схема для дослідження розподілу контактного тиску в сполученні базової плити штампа із підкладною плитою преса

Таблиця 4.9 – Варіанти параметрів розрахункових схем (див. рис. 4.3)

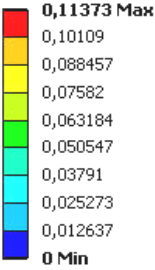
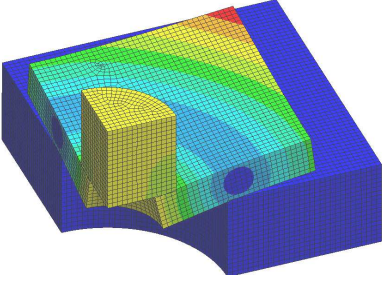
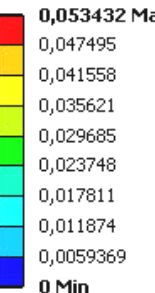
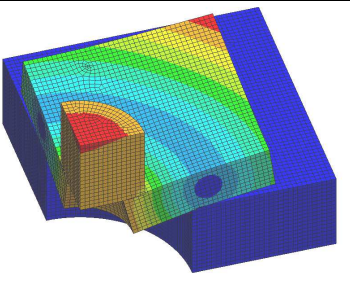
№	$P_{шт}$, кН	h , мм	№	$P_{шт}$, кН	h , мм	№	$P_{шт}$, кН	h , мм	№	$P_{шт}$, кН	h , мм
1	15	11	6	15	14	11	15	17	16	15	20
2	30		7	30		12	30		17	30	
3	45		8	45		13	45		18	45	
4	60		9	60		14	60		19	60	
5	75		10	75		15	75		20	75	

У той же час розрахункові дослідження здійснювалося МСЕ на порів-

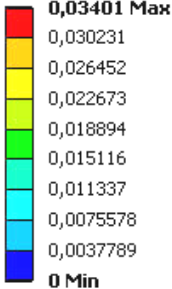
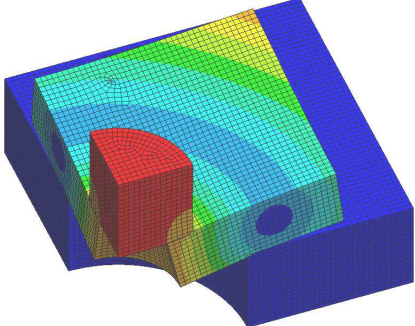
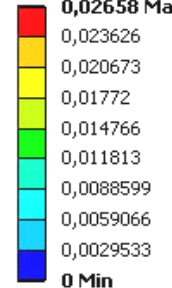
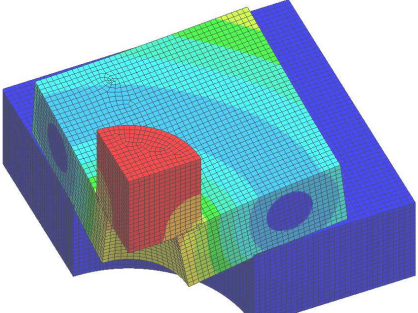
няно невеликих сітках із застосуванням скінченних елементів типу Shell [30]. Це не давало можливості отримувати прийнятну базу для розрахунково-експериментального обґрунтування адекватності математичних моделей, докладності чисельних моделей та точності одержуваних результатів.

Для усунення цього недоліку для розрахункових досліджень було залучено метод скінченних елементів у просторовій постановці із використанням скінченних елементів типу Solid. При цьому в зонах сполучення плити із пакетом і плити із підштамповою плитою преса задавалися граничні умови типу контакту з тертям (коефіцієнт тертя – 0,2). Для здійснення чисельного моделювання були прийняті такі значення розрахункових параметрів: $P_{шт} = 45,0$ кН, $D_0 = 90$ мм, $h_0^* = h_0 = 100$ мм, $a_0 = 280$ мм, $b_0 = 250$ мм, $a_1 = 48$ мм, $b_1 = 71$ мм і $r = 5$ мм – радіус скруглення. У табл. 4.10–5.15 представлені результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану базових плит у вигляді просторових розподілів напружень, переміщень, контактної тиску для випадку $D = 170$ мм.

Таблиця 4.10 – Розподіл повних переміщень в досліджуваній системі "блок – базова плита – підштампова плита" ($P_{шт} = 45$ кН)

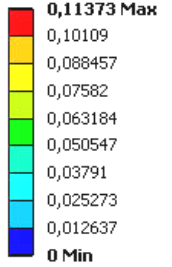
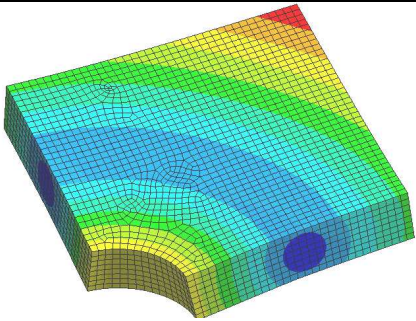
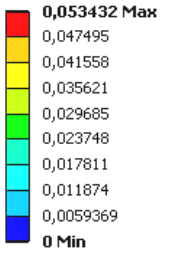
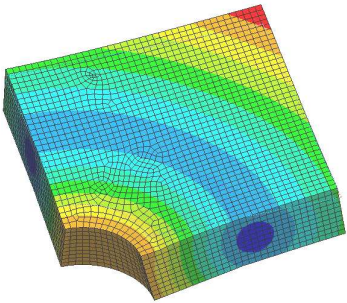
h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
11	0,11	 <p>0,11373 Max 0,10109 0,088457 0,07582 0,063184 0,050547 0,03791 0,025273 0,012637 0 Min</p>	
14	0,053	 <p>0,053432 Max 0,047495 0,041558 0,035621 0,029685 0,023748 0,017811 0,011874 0,0059369 0 Min</p>	

Закінчення табл. 4.10

h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
17	0,034	<p>0,03401 Max</p>  <p>0 Min</p>	
20	0,0265	<p>0,02658 Max</p>  <p>0 Min</p>	

На рис. 4.4 приведені порівняльні дані про розподіл контактної тиску у сполученні базової плити штампку з підкладною плитою пресу.

Таблиця 4.11 – Розподіл повних переміщень в базовій плиті ($P_{шт} = 45$ кН)

h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
11	0,11	<p>0,11373 Max</p>  <p>0 Min</p>	
14	0,053	<p>0,053432 Max</p>  <p>0 Min</p>	

Закінчення табл. 4.11

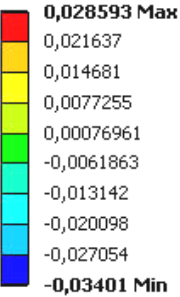
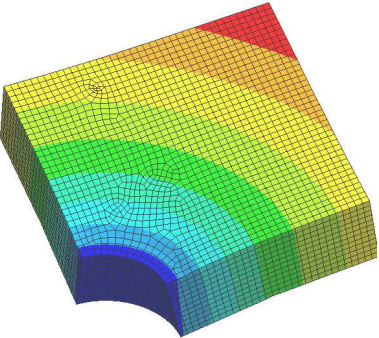
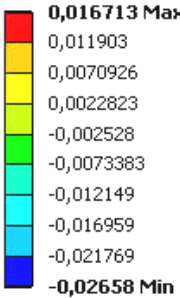
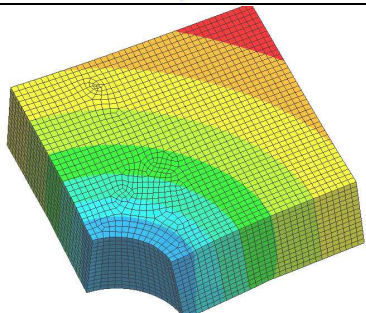
h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
17	0,034	<p>0,03401 Max 0,030231 0,026452 0,022673 0,018894 0,015116 0,011337 0,0075578 0,0037789 0 Min</p>	
20	0,0265	<p>0,02658 Max 0,023626 0,020673 0,01772 0,014766 0,011813 0,0088599 0,0059066 0,0029533 0 Min</p>	

Номери відповідають різним поєднанням проектних параметрів штампу.

Таблиця 4.12 – Розподіл осьових повних переміщень в базовій плиті ($P_{шт} = 45$ кН)

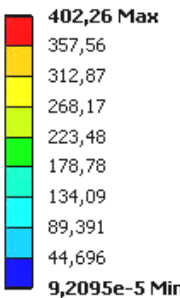
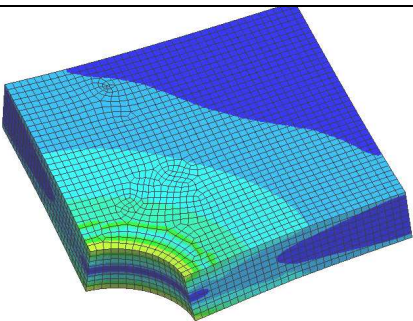
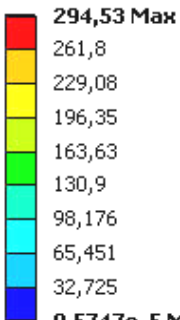
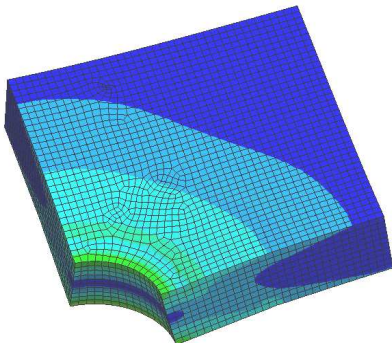
h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу осьових переміщень
11	0,11; -0,083	<p>0,11307 Max 0,091266 0,069458 0,047651 0,025843 0,004036 -0,017771 -0,039579 -0,061386 -0,083194 Min</p>	
14	0,052; -0,047	<p>0,052875 Max 0,041673 0,030471 0,019269 0,0080666 -0,0031354 -0,014338 -0,02554 -0,036742 -0,047944 Min</p>	

Закінчення табл. 4.12

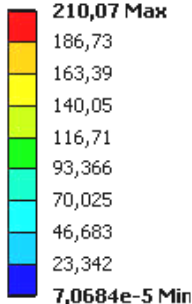
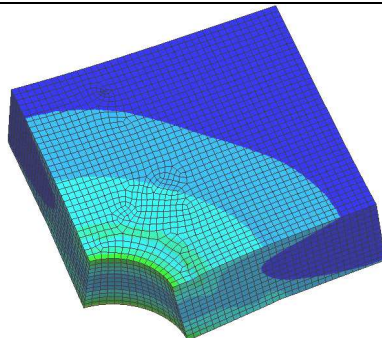
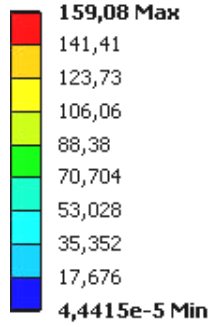
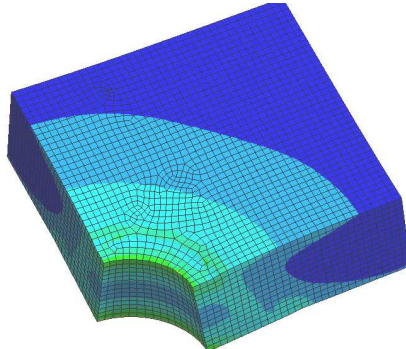
h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу осьових переміщень
17	0,028; -0,034	 <p>0,028593 Max 0,021637 0,014681 0,0077255 0,00076961 -0,0061863 -0,013142 -0,020098 -0,027054 -0,03401 Min</p>	
20	0,0167; -0,026	 <p>0,016713 Max 0,011903 0,0070926 0,0022823 -0,002528 -0,0073383 -0,012149 -0,016959 -0,021769 -0,02658 Min</p>	

Відмінність чисельних і цих експериментальних досліджень складає 10–12 %.

Таблиця 4.13 – Розподіл еквівалентних (по Мизесу) напружень у базовій плиті ($P_{шт} = 45$ кН)

h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Розподіл еквівалентних (за Мизесем) напружень у базовій плиті
11	402,26	 <p>402,26 Max 357,56 312,87 268,17 223,48 178,78 134,09 89,391 44,696 9,2095e-5 Min</p>	
14	294,53	 <p>294,53 Max 261,8 229,08 196,35 163,63 130,9 98,176 65,451 32,725 9,5747e-5 Min</p>	

Закінчення табл. 4.13

h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Розподіл еквівалентних (за Мизесем) напружень у базовій плиті
17	210,07	 <p>210,07 Max 186,73 163,39 140,05 116,71 93,366 70,025 46,683 23,342 7,0684e-5 Min</p>	
20	159,08	 <p>159,08 Max 141,41 123,73 106,06 88,38 70,704 53,028 35,352 17,676 4,4415e-5 Min</p>	

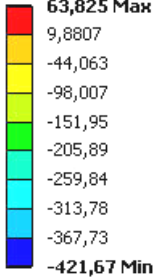
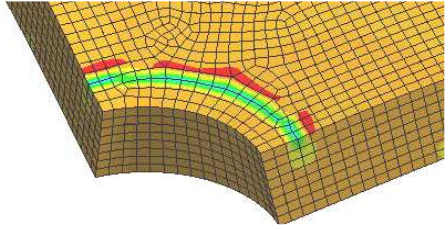
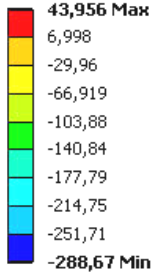
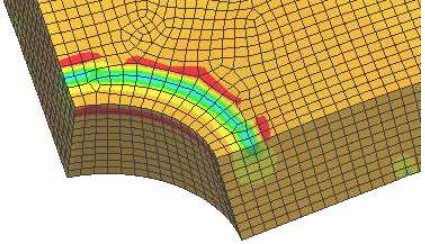
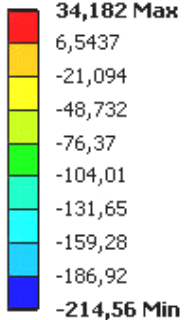
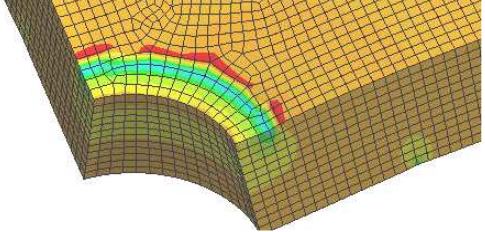
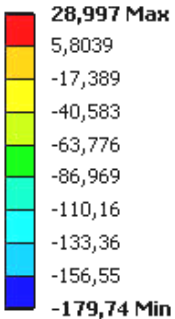
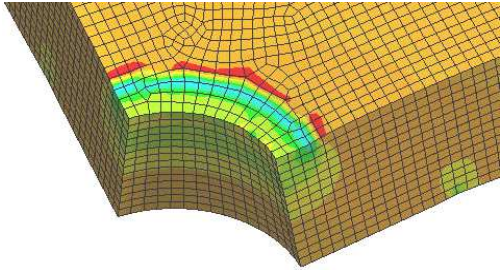
Це пояснюється тим, що, на відміну від варіанту методу граничних інтегральних рівнянь (МГІР), який був використаний у роботі [30] для порівняльного визначення точності аналізу напружено-деформованого стану нижніх базових плит, у цій роботі був залучений МСЕ без яких-небудь спрощуючих допущень відносно властивостей контактуючих тіл.

Як відзначалося вище, детальні картини розподілу компонент напружено-деформованого стану, отримані в цій роботі, наведені в табл. 4.10–4.15. Спостерігається досить хороша кількісна і якісна відповідність результатів (похибка – до 10–12%).

Виявлена відповідність істотно краща, ніж у цих же експериментальних даних із отриманими чисельно МГІР і описаними у роботі [30] (похибка на рівні 25–30%). Тут особливо важливо підкреслити відмінність характеристик розподілів: отримані чисельно у цій роботі результати набагато краще відповідають експериментальним даним [30], чим раніше отримані та описані

в цій роботі чисельні результати.

Таблиця 4.14 – Розподіл осьових нормальних напружень у базовій плиті ($P_{шт} = 45$ кН)

11	63,82; -421,6		
14	43,95; -288,67		
17	34,1;-214,34		
20	28,99; -179,7		

Крім того, були також залучені результати експериментальних досліджень базових плит методом голографічної інтерферометрії за допомогою голографічної установки СІН-1.

На рис. 1.12, *a* наведена схема установки, на рис. 1.125, *б* – блок

розділового переналагоджуваного штампу на гідравлічному пресі [30]. На рис. 1.13, 1.14 – приклад інтегферограми та її розшифровка. Видно (див. табл. 4.2–4.10, 4.10–4.16), що ці результати знаходяться у повній якійсній відповідності з чисельними результатами, відмінність кількісно знаходиться на рівні 10–15%.

Таблиця 4.15 – Розподіл контактного тиску в зонах контактної взаємодії елементів досліджуваної системи "базова плита – підштампова плита" ($P_{шт} = 45$ кН)

11	170,58	<p>170,58 Max</p> <p>151,63 132,68 113,72 94,769 75,815 56,861 37,908 18,954 0 Min</p>	
14	123,31	<p>123,31 Max</p> <p>109,61 95,907 82,206 68,505 54,804 41,103 27,402 13,701 0 Min</p>	
17	92,3	<p>92,303 Max</p> <p>82,048 71,792 61,536 51,28 41,024 30,768 20,512 10,256 0 Min</p>	
20	71,44	<p>71,443 Max</p> <p>63,505 55,567 47,629 39,691 31,753 23,814 15,876 7,9382 0 Min</p>	

Таблиця 4.16 – Розподіл контактної тиску в зонах контактної взаємодії елементів досліджуваної системи "пакет – базова плита" ($P_{шт} = 45$ кН)

11	362,7	<p>362,78 Max 322,48 282,17 241,86 201,55 161,24 120,93 80,619 40,309 0 Min</p>	
14	253,58	<p>253,58 Max 225,41 197,23 169,06 140,88 112,7 84,528 56,352 28,176 0 Min</p>	
17	196,99	<p>196,99 Max 175,1 153,21 131,32 109,44 87,549 65,662 43,775 21,887 0 Min</p>	
20	167,39	<p>167,39 Max 148,8 130,2 111,6 92,997 74,398 55,798 37,199 18,599 0 Min</p>	

Із зіставлення комплексу отриманих результатів випливає, що дані чисельних і експериментальних досліджень знаходяться у повній якісній та за-

довільній кількісній відповідності (похибка складає 10-15 %).

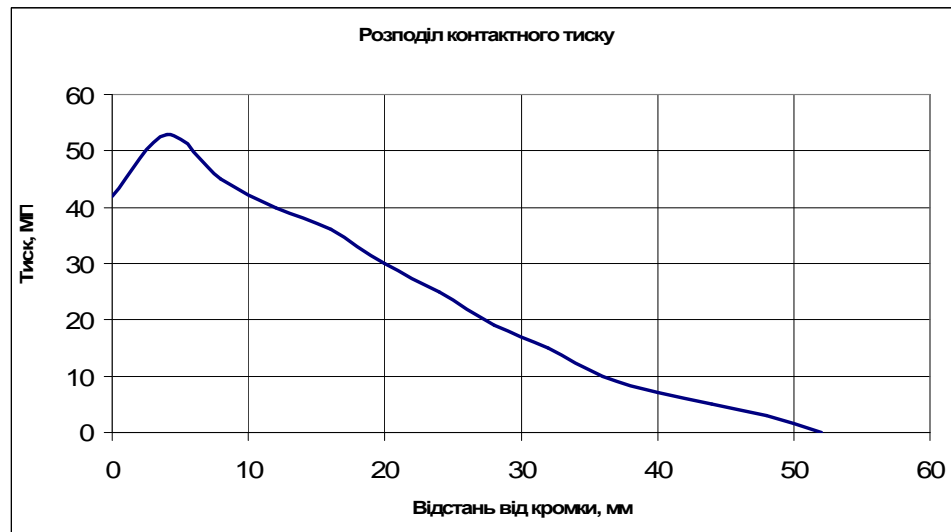


Рисунок 4.4 – Розподіл контактних напружень у зоні контакту нижньої базової плити з підштамповою плитою пресу

Крім того, спостерігається повна якісна відповідність даних експериментальних досліджень між собою, причому отриманих як самостійно, так і іншими дослідниками. Зокрема, мова йде про характер локалізації контактних зон і контактної тиску, про закони розподілу тиску у сполученні тіл на поверхнях узгодженої форми тощо.

На окрему увагу заслуговує якісна особливість, яка була теоретично обґрунтована у роботах [1–19, 146], виявлена у ході чисельних досліджень, а також підтверджена в ході експериментів. Йдеться про закономірності розподілу контактних зон і контактної тиску у сполученні елементів штампного оснащення при множинному контакті на поверхнях узгодженої форми, в цьому випадку – на плоских ділянках. У цих випадках контактні площадки практично не залежать від діючих зусиль, закон розподілу контактної тиску також не змінюється із варіюванням діючих зусиль, а його рівень залежить практично лінійно від цих зусиль.

Таким чином, можна зробити висновок, що чисельні результати, отримані із застосуванням створених і описаних у роботі скінченно-елементних моделей,

знаходяться у задовільній відповідності до експериментально отриманих даних, причому як у ході власних випробувань, так і в ході випробувань, проведених іншими дослідниками.

4.2 Результати експериментальних досліджень контактної взаємодії пакета із блоком розділових штампів із використанням чутливих до тиску плівок

Для додаткового визначення характерних особливостей контактної взаємодії елементів розділових штампів було проведено макетне моделювання дії змінного пакета на систему " підкладна плита – базова плита розділового штампа". Для цього на прямокутну плиту, що імітувала систему плит, було прикладено імітатор пакета – призму. Зусилля штампування прикладалося за допомогою гвинтового механізму. Для реєстрації контактної тиску застосовується чутлива до тиску плівка. На рис. 4.5 наведена схема стенду, на рис. 4.6–4.9 – його фото та робочі моменти випробувань, а на рис. 4.10–4.12 – отримані результати.

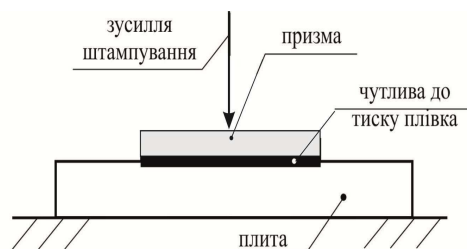
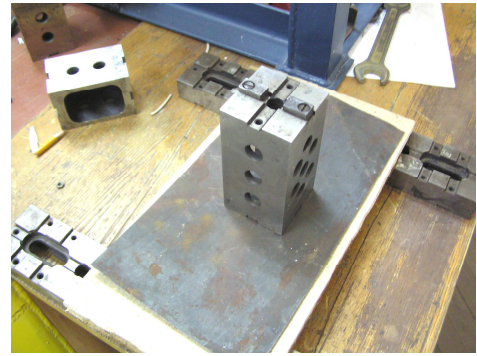


Рисунок 4.5 – Стенд для дослідження контактної взаємодії пакета із плитою

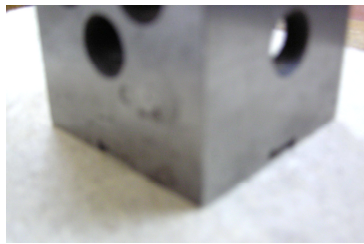
Як видно, контактна зона розташована по периферії області спряження пакета із плитою. Контактний тиск уздовж периметра нижньої поверхні пакета розподілений нерівномірно. Найявна його концентрація в зоні кутових точок периметру. Усі виявлені характерні якісні особливості повністю відповідають виявленим раніше шляхом чисельних досліджень (див. розд. 3 та

підрозд. 4.1). Щодо кількісної оцінки узгодженості, то можна звернутися до результатів чисельного моделювання, представлених у роботі [178]. Вона знаходиться на рівні 80–85 %.

*a**б*

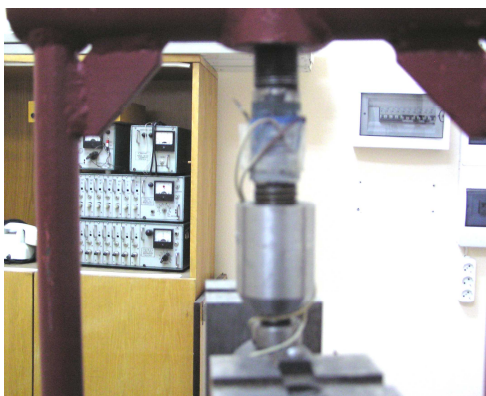
a – загальний вигляд стану; *б* – макет базової плити штампу із пакетом

Рисунок 4.6 – Елементи стану

*a**б*

a – зона контактної взаємодії пакета із базовою плитою; *б* – комплект універсальних збірних пристосувань

Рисунок 4.7 – Елементи стану

*a**б*

a – вимірювач сили (месдоза); *б* – навантажувальний пристрій; *є*

Рисунок 4.8 – Елементи стану

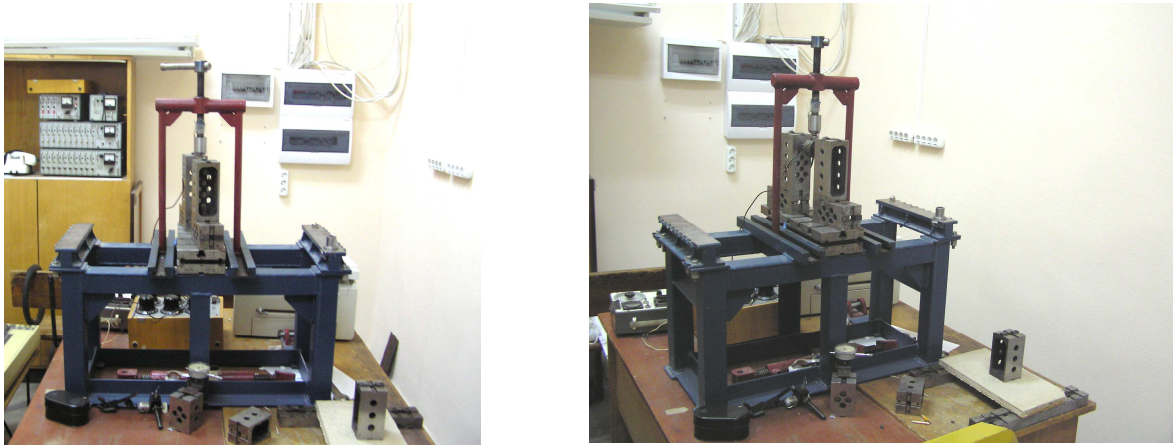


Рисунок 4.9 – Робочі моменти випробувань

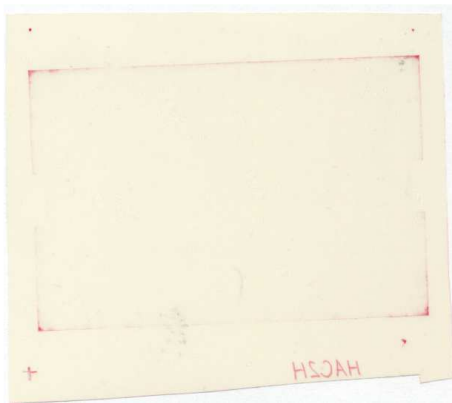
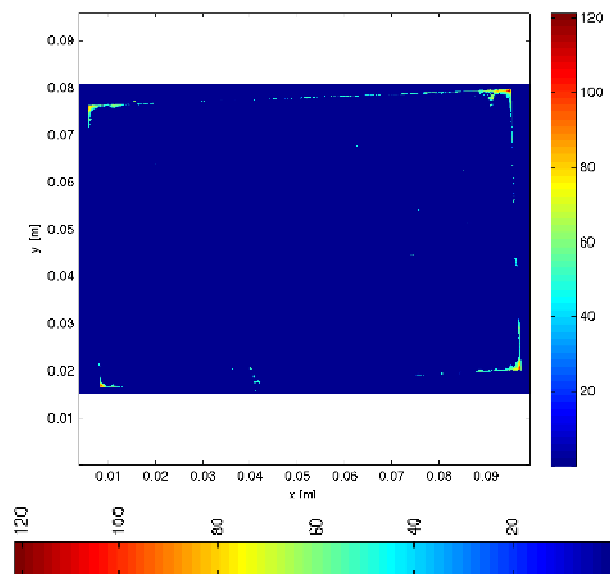
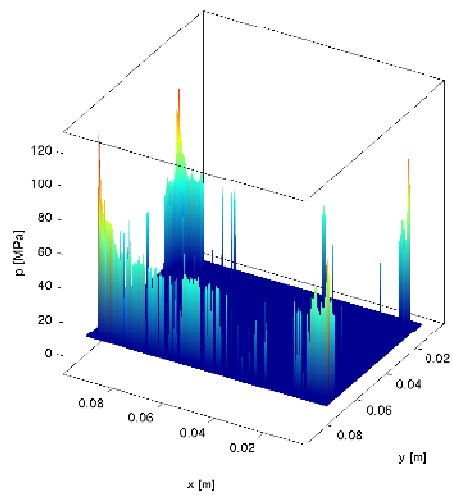
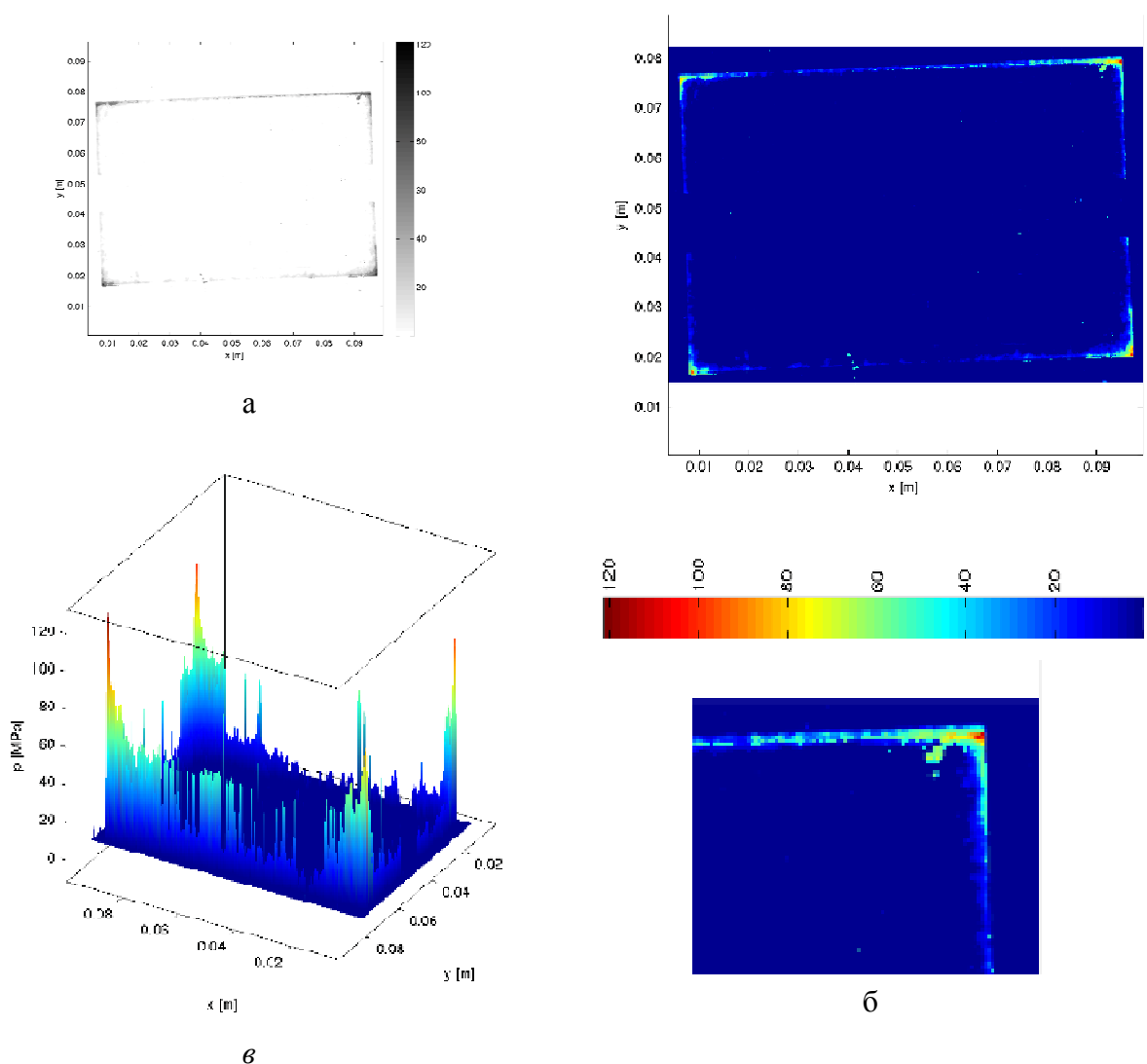
*a**б**в**a* – відбиток, *б, в* – розподіл тиску

Рисунок 4.10 – Результати дослідження взаємодії макета пакета з базовою плитою (НС плівка, площа поверхні – 39.66 мм², $P = 2154.52$ Н, $p_{\max} = 121.21$ МПа)

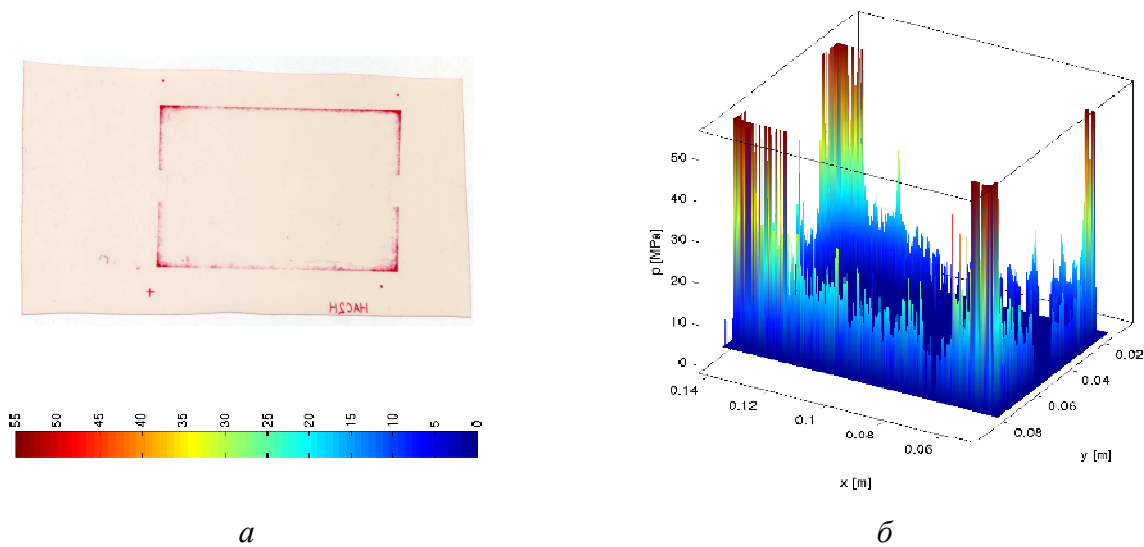
На рис. 4.10–4.12 наведені типові розподіли контактного тиску, де від-

мічені вище якісні особливості явно прослідковуються. Разом із тим, як видно із наведених картин, величина максимального контактного тиску сильно залежить від шорсткості поверхонь контактуючих деталей та радіусів скруглення на ребрах штамп. Враховуючи, що наявність чутливої плівки також впливає на контактну жорсткість у спряженні досліджуваних елементів, то і цей чинник потрібно врахувати. Проте, незважаючи на труднощі чисельної оцінки невідповідальності результатів досліджень, якісна відповідальність результатів очевидна.



a – відбиток, *б, в* – розподіл тиску

Рисунок 4.11 – Результати дослідження взаємодії макета пакета із бабовою плитою (HSMS плівка (2 плівки), площа поверхні – 358.08 мм², $P = 5938.11$ Н, $p_{\max} = 121.21$ МПа)



a – відбиток, *б* – розподіл тиску

Рисунок 4.12 – Результати дослідження взаємодії макета пакета з базовою плитою (MS плівка, площа поверхні – 286.94 мм², $P = 4754.12$ Н, $p_{\max} = 55$ МПа)

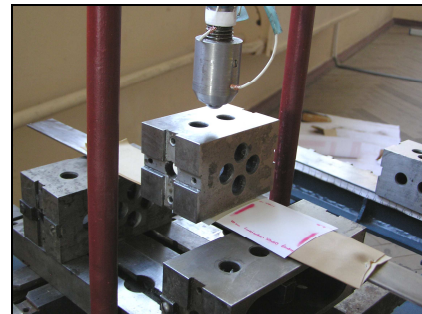
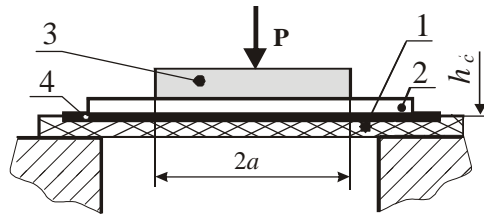


Рисунок 4.13 – Вимір контактного тиску між жорсткою накладкою та стержнем: схема і реалізація

Виявлені особливості розподілу контактного тиску підтвержуються на прикладі модельної задачі, що описана у [9]. У цьому випадку було додатково враховано вплив податливості поверхневих шарів (наприклад, за рахунок шоркості). На рис. 4.13 наведено схему установки, на рис. 4.14 – експериментальну установку, а на рис. 4.15 – результати експерименту. Видно, що кон-

тактний тиск локалізується на периферії зони контакту. Це підтверджує результати попередніх досліджень.

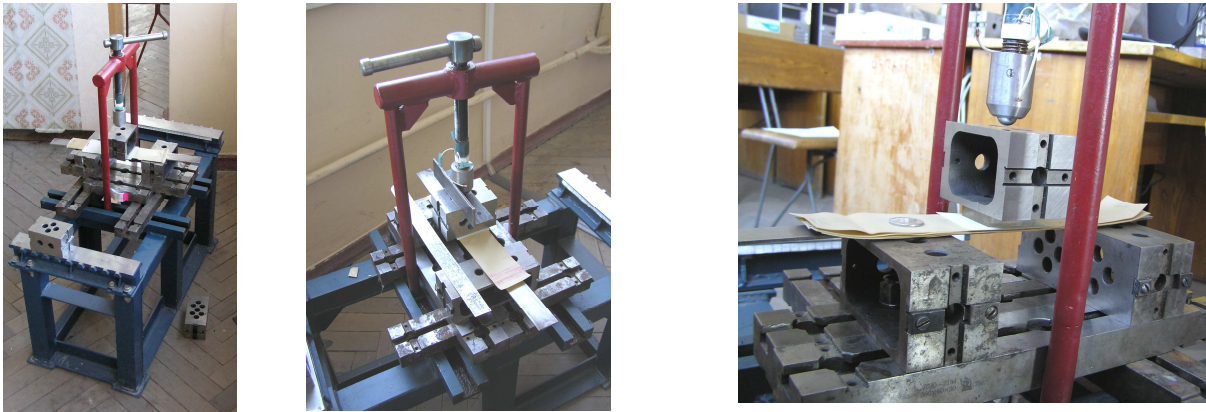


Рисунок 4.14 – Експериментальна установка та робочі моменти випробувань

	<i>Одиная толщина резинового слоя</i>	<i>Двойная толщина резинового слоя</i>	<i>Четверная толщина резинового слоя</i>
<i>Вариант 1</i>			
<i>Вариант 2</i>			

Рисунок 4.15 – Приклади контактних відбитків у сполученні "накладка–стержень" при варіюванні податливості гумового шару

У подальших дослідженнях (див. розд. 5) шукана кількісна оцінка була здійснена. Таким чином, на етапі розрахунково-експериментальних досліджень встановлено якісну відповідність аналізу розподілу контактного тиску між пакетом та плитами. Це підтверджує достовірність і точність резуль-

татів, наведених у підрозд. 3.5, 3.6, 4.1. Разом із тим задля визначення кількісної відповідності передбачені додаткові дослідження, описані у розд. 5.

Висновки за розділом 4

За матеріалами розділу можна зробити наступні висновки.

1. Експериментально підтверджено, що множинний контакт ріжучих елементів розділових штампів здійснюється на фактично постійних за формою і площею областями незалежно від величини зусилля штампування. Контактний тиск на областях контакту базових плит блоків зі змінним пакетом і підштамповою плитою преса розподіляється нерівномірно, при цьому максимуми досягаються, як правило, на периферії області контакту. При цьому закон розподілу практично не залежить від величини зусилля штампування.

2. Установлена більш висока точність моделювання напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення за розробленими методами і моделями порівняно зі спрощеними методами, які традиційно застосовувалися іншими дослідниками.

3. Підтверджена близька до лінійної залежність максимального контактного тиску характер між елементами розділового штампного оснащення від зусилля штампування. Відповідно, для розрахунку напружено-деформованого стану цих елементів достатньо провести розрахунок для одного варіанта того чи іншого РШ, а потім для різних варіантів змінних пакетів, матеріалів, форм і розмірів штампованих деталей проводити оцінку міцності, жорсткісних і стійкісних характеристик за лінеаризованими залежностями компонент напружено-деформованого стану від зусилля штампування (незважаючи на суттєву нелінійність задачі про контактну взаємодію). Це істотно підвищує оперативність при збереженні точності.

4. Установлено, що похибка отриманих у дисертації чисельним шляхом результатів не перевищує 10–17% порівняно із більш високим рівнем похиб-

ки при застосуванні спрощених моделей у дослідженнях, здійснених раніше і описаних в інших роботах.

5. Експериментально підтверджено прогнозована та чисельно визначена незмінність характеру розподілу контактної тиску між елементами штампового оснащення при варіюванні сили штампування. Тиск концентрується на периферії контактних областей. При цьому характер розподілу залежить від сили штампування, а сам тиск йому прямо пропорційний.

Результати розділу висвітлені у роботах [1–5, 9, 18, 19, 20, 29].

5 ВИРОБНИЧІ ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО

5.1 Обґрунтування раціональних проектно-технологічних рішень розділових штампів

Результати здійснених чисельних та експериментальних досліджень елементів розділових штампів (див. розд. 3, 4) дають основу для впровадження розроблених методів, моделей та рекомендацій у виробництво. Виходячи з цього, сформульовані загальні рекомендації щодо обґрунтування проектно-технологічних рішень елементів РШ. Далі на прикладі здійснених свого часу виробничих випробувань розділового переналагоджуваного штампів (див. розд. 1) визначено відповідність отриманих результатів даним, отриманим у ході чисельних та експериментальних досліджень, а також обґрунтованість розроблених рекомендацій. На завершення описане впровадження результатів досліджень у виробництво на підприємствах бронетанкобудівної галузі.

Стосовно обґрунтування проектно-технологічних рішень розділових штампів за критеріями стійкості, міцності, жорсткості та точності виконання технологічних операцій можна зазначити, що воно базується на результатах дослідження напружено-деформованого стану елементів розділових штампів (див. розд. 3). У цьому підрозділі розглядається загальний підхід до розв'язання цієї задачі у методологічному плані.

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

- стійкість та міцність – від рівня напружень у основних, найбільш навантажених елементах штампового оснащення:

$$\sigma_{\text{екв}}^{\text{max}} \leq [\sigma], \quad (5.1)$$

де $\sigma_{\text{екв}}^{\text{max}}$ – максимальні еквівалентні напруження в ЕШО,

$[\sigma]$ – допустимі напруження; їхня величина обумовлюється або необхідністю забезпечення втомної міцності (витривалості) для базових елементів блоків, або – статичної міцності (для елементів змінних пакетів при дрібносерійному виробництві);

- жорсткість та точність штампування – від рівня переміщень і поворотів у елементах штампового оснащення

$$w_{\text{max}} \leq [w]; w'_{\text{max}} \leq [w'], \quad (5.2)$$

де w_{max} , w'_{max} – максимальні переміщення та кути повороту (наприклад, для нижніх базових плит),

$[w]$, $[w']$ – їх допустимі значення, що визначаються вимогами до штампуємої деталі.

Дотепер відомі підходи були застосовані для частинних випадків розрахунку ЕШО, причому на спрощених моделях напружено-деформованого стану. У цій роботі на основі сукупності результатів розрахунку НДС елементів штампового оснащення з урахуванням множинної контактної взаємодії (тобто із застосуванням більш адекватних і точних моделей порівняно з традиційними) пропонується будувати відповідну базу даних. У цій поповнюваній базі даних зберігається інформація про залежності

$$\sigma_{\text{екв}}^{\text{max}} = \sigma_{\text{екв}}^{\text{max}}(p), w_{\text{max}} = w_{\text{max}}(p), w'_{\text{max}} = w'_{\text{max}}(p). \quad (5.3)$$

Замінюючи у (5.2) ліві частини відповідними допустимими величинами $[\sigma]$, $[w]$, $[w']$, можна знайти розв'язок сукупності співвідношень (5.3). Таким чином, можна знайти такі проектно-технологічні параметри, які задовольняють усім вимогам, що пред'являються.

Перевагою цього підходу (порівняно з відомими), є висока оперативність та точність, що є дуже цінним в умовах стислих термінів і обмежених матеріальних ресурсів при проектуванні технологічного оснащення для штампування деталей на підприємствах в умовах низької серійності виробів та швидкої зміни їхньої номенклатури.

Зокрема, в цьому підрозділі використані результати досліджень із застосуванням комплексної моделі напружено-деформованого стану елементів розділових штампів, запропонованої та реалізованої у розд. 2, 3. Отримані результати дають змогу обґрунтувати наступні загальні рекомендації:

- для забезпечення можливості варіативності геометричних і чисельних моделей елементів штампового оснащення інтегрованою і адаптований підхід із застосуванням методу узагальненого параметричного моделювання. Цим самим забезпечується, на відміну від традиційних підходів, безконфліктна побудова моделей елементів штампового оснащення в широкому діапазоні варіювання їхніх проектно-технологічних параметрів. У свою чергу, цим самим створена основа варіативної зміни об'єкта, що досліджується.

- розроблено загальний підхід до алгоритму підвищення точності та оперативності чисельних досліджень напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення (див. розд. 3) за рахунок обґрунтування диференційованого призначення умов контактного сполучення за наявності множинних контактів деталей штампів. Цим самим забезпечується, на відміну від традиційних підходів, можливість проведення багатоваріантних чисельних досліджень ЕШО на етапах проектування паралельно з іншими роботами;

- створений спеціалізований програмно-модельний комплекс відрізняється від відомих гнучкою модульною структурою, що поєднує, з одного боку, розвинені засоби геометричного та скінченно-елементного моделювання універсальних CAD/CAM/CAE-систем, з одного боку, та

націленість на об'єкт – елемент штампового оснащення – за рахунок спеціалізованих програмних модулів, – з іншого. Завдяки такій структурі вдається отримати нову якість досліджень – безконфліктне оперування з великими обсягами інформації. Крім того, перенацілювання на новий об'єкт досліджень, на відміну від універсальних або спеціальних CAD/CAM/CAE–систем, вимагає доопрацювання тільки окремих модулів. Також новою відмінною особливістю створеного СПМК є наявність поповнюваної бази даних, яка акумулює результати попередніх досліджень, ще більшою мірою підвищує оперативність розрахунків і знижує їх обсяг, а також створює передумови для побудови експертних систем та баз знань з обґрунтування проектних рішень ЕШО за критеріями стійкості, міцності, жорсткості та точності виконання технологічних операцій;

- у роботі представлено підхід до створення комплексних розрахункових схем елементів штампового оснащення. Вони відрізняються від традиційних розрахункових схем включенням у єдину інтегровану розрахункову схему всіх основних елементів розділових штампів, причому з урахуванням їх контактної взаємодії значення контактної тиску визначається у ході розв'язання контактної задачі, а не задається заздалегідь відомим;

- на прикладі ряду частинних моделей ЕШО визначено особливості їхнього напружено-деформованого стану з урахуванням контактної взаємодії (див. розд. 3). Зокрема, встановлено суттєво нерівномірний розподіл контактної тиску, переміщень і напружень, причому концентрація контактної тиску і напружень спостерігається у зоні контактування окремих елементів штампів.

- установлені у розд. 3 залежності інтегральних характеристик напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення (максимальні переміщення, контактний тиск і напруження) від варіюваних проектно-технологічних параметрів підтверджені у ході експериментальних досліджень (див. розд. 4).

- створений спеціалізований програмно-модельний комплекс технологія

досліджень дає можливість проведення багатоваріантних досліджень НДС елементів штампового оснащення з урахуванням контактної взаємодії, а, відповідно, формувати рекомендації щодо обґрунтування проектно-технологічних параметрів розділових штампів.

Таким чином, створені підходи, методи та моделі для обґрунтування проектно-технологічних рішень при розробленні елементах штампового оснащення на прикладі розділових штампів. Ці розробки передані для впровадження на підприємствах вітчизняного машинобудування.

5.2 Дослідно-промислові впровадження елементів розділових штампів

Результати досліджень напружено-деформованого стану елементів розділових штампів (див. розд. 3, 4) дали змогу сформувавши рекомендації щодо обґрунтування проектно-технологічних рішень при їх проектуванні, технологічній підготовці виробництва та у процесі виготовлення готових виробів. Ці рекомендації потребують перевірки своєї обґрунтованості. З цією метою були залучені результати виробничих випробувань розділового переналагоджувального штампі серії РПШ. Вони свого часу були розроблені в Харківському НДІ технології машинобудування (м. Харків), упроваджені на підприємствах бронетанкобудуваної галузі, а їх виробничі випробування описані у роботі [30] (див. розд. 1). Відповідно, у цьому підрозділі описані порівняльні результати, одержані за допомогою методів і моделей, розроблених у цій роботі та переданих й упроваджених, зокрема, на ДП "Завод ім. В. О. Малишева" та ТОВ "ЮТАС", з одного боку, та результатів, описаних у згаданій роботі [30], – з іншого.

Порівняння отриманих результатів з даними чисельного моделювання та лабораторних досліджень (див. розд. 3, 4) підтверджує повну якісну відповідність розподілів напружень та задовільну – кількісну. Рівень

напружень, зафіксований чисельно, відрізняється на 15–20% від реально вимірюного датчиками. Крім того, продемонстровано, що матеріал базової плити та інших деталей штампа із рекомендованими параметрами забезпечує роботу у пружній області.

Таким чином, у цілому підтверджується обґрунтованість рекомендацій, розроблених на основі дисертаційних досліджень.

5.3 Впровадження результатів дисертаційних досліджень у виробництво

Розроблені методи, моделі та рекомендації передані для впровадження на ДП "Завод. ім. О.В Малишева" у ході виконання договорів про співробітництво між НТУ "ХП" та цим підприємством. Ці результати були використані при технологічній підготовці виробництва об'єктів бронетанкової техніки. Як свідчить практика, значну частину усіх витрат на технологічну підготовку виробництва такого типу підприємств складає проектування та виготовлення штампів. Для підвищення оперативності та зниження витратності пропонується замість спеціальної застосувати переналагоджуване штампове оснащення. Зокрема, на підприємствах спеціального транспортного машинобудування успішно застосовуються розроблені та експлуатовані згідно з результатами дисертаційних досліджень:

- універсально-збірні штампи (УЗШ);
- спеціалізовані переналагоджувані штампи;
- універсальні переналагоджувані штампи з механізованими прихватами тощо.

При цьому за способом закріплення у блоці пакетів розроблених штампів розрізняють механічний, магнітний, пневматичний, електромагнітний та гідравлічний спосіб. Крім того, штампи класифікуються

за формою та розмірами деталей, суміщеністю технологічних операцій, видом формотворних частин, а також видом деформівного середовища [173, 174]. Незважаючи на різноманітні конструктивні схеми, розроблені у дисертації моделі продемонстрували свою працездатність та застосовність. При цьому завдяки розвитку переналагоджуваної оснастки вдається замінити до 50% спеціальних штампів для листової штамповки в умовах серійного та до 90% – в умовах дрібносерійного виробництва.

Отже, упровадження переналагоджуваних штампів призводить до економічних, технічних, технологічних та експлуатаційних переваг порівняно зі стаціонарними розділовими штампами. Це дає суттєве (у 2÷3 рази) скорочення термінів та витрат на технологічну підготовку виробництва на машинобудівних підприємствах.

Крім того, розроблені моделі та засоби були передані для впровадження у ТОВ "ЮТАС" (м. Мелітополь). У результаті розроблено низку штампів для виробництва деталей автомобільної та сільськогосподарської техніки.

Рекомендації, методи та моделі, передані на ДП "Завод ім. В. О.Малишева", у ПАТ "Азовмаш" та ТОВ "ЮТАС" дали суттєвий економічний ефект. Він досягнутий за рахунок скорочення витрат на проектні дослідження штампів для розділових операцій (рис. 5.1) і складає 320 тис. грн. відповідно до дольової участі здобувача (див. Додатки). Розроблені на основі впровадження результатів штампи застосовані для виготовлення деталей об'єктів військової та цивільної техніки. Крім того, отримані результати упроваджені у ході виконання бюджетних тем, господарчих та договорів про співробітництво з низкою підприємств України та за тематичним планом НТУ "ХП" (див. Додатки).

Висновки за розділом 5

Описані у розд. 5 матеріали випробувань та впроваджень дають основу

для наступних висновків.



Рисунок 5.1 – Об'єкти впровадження розробок на машинобудівних підприємствах

1. Розроблені загальні рекомендації мають, крім методологічного, ще й конкретне прикладне значення. Воно полягає у тому, що на основі створених у роботі моделей та методів можлива побудова спеціалізованої бази даних. Ця база даних містить інформацію про проектні, технологічні, експлуатаційні характеристики штампів для розділових операцій листового штампування, а також визначені розрахунковим шляхом характеристики міцності, стійкості, жорстості та точності виконання технологічних операцій. Це дає змогу в автоматизованому режимі здійснювати підбір готових

штампів або обґрунтування основних проектних параметрів нових штампів відповідно до потреб реального виробництва, конкретного підприємства та вимог того чи іншого виробу.

2. Виробничі випробування штампів для розділових операцій дають підстави для підтвердження обґрунтовності рекомендацій щодо проектно-технологічних параметрів розділових переналагоджуваних штампів. Це слугує інтегральним підтвердженням адекватності побудованих математичних та чисельних моделей, а також точності результатів, отриманих за їх допомогою. Таким чином, результати досліджень можуть бути поширені на широкий клас подібних конструкцій.

3. Упровадження результатів досліджень, здійснене на ДП "Завод ім. О.В. Малишева", ПАТ "Азовзагальмаш", ТОВ "ЮТАС" та у науково-дослідницьких роботах за тематичним планом НТУ "ХПІ", дало можливість досягнути економічного ефекту у сумі 320,0 тис. грн. Крім того, результати досліджень упроваджені у науково-дослідницький процес НТУ "ХПІ" за бюджетними темами та договорами із іншими підприємствами України.

Результати розділу висвітлені у роботах [3, 9, 18].

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, можливість розв'язання не лише одиничних задач аналізу, але і цілих їх серій у автомати-

зованому 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 контактного 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 установлена 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 роз-

ділових 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, фіксуючого 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 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 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 машино-

будівних 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 "ХП" для студентів спеціальностей "Прикладна механіка".

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. – Режим доступу: <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/article/view/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. – Краматорск: 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 штамсів: моделі, закономірності, критерії проектних рішень. / О. А. Іщенко, 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 «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – № 47 (953). – С. 34–38.

9. Демина Н.А. Экспериментальные исследования контактного взаимодействия матриц 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

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. – Мелитополь: 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: Запорізь. нац. техн. ун-т, 2013. – № 1. – С. 93–96.

15. Параметрические модели для компьютерного 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 доступа: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2016_39.pdf, <https://drive.google.com/file/d/0B58M3iphitDVWjFxDJZazRhbkU/view>

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 доступа: 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 доступа: ISSN 2519-2671

18. 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.

19. 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 «ХП». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – № 22. – С. 147–169.

20. 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 «ХП». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – № 3. – С. 88–100.

21. Шеремет В.М. Теорія та практика моделювання фізико-механічних процесів у складних механічних системах / В.М. Шеремет, О.А. Іщенко, 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.

22. 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.

23. 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 XX міжн. наук.-практ. конф. (15-17 травня 2012 р., Харків). Ч. 1. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – С. 161.

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

25. 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 XXII міжнар. наук.-практ. конф. (21-23 травня 2014 р., Харків) / за ред. проф. Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО. Ч. 1. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014.– С. 202.

26.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.

27.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 XXIV міжнар. наук.-практ. конф. (18-20 травня 2016 р., Харків) / за ред. проф. Сокола Є. І. Ч. 1. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016.– С. 194.

28.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 // Материали 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 «ХПІ», 2016. – С. 27–30.

29.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. XXV міжн. наук.-практ. конф. MicroCAD-2018, 16–18 травня 2018 р.: у 4 ч. Ч. I. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 170.

30 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.

31. Дьоміна Н.А. Удосконалення методів розрахунку елементів штампового 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.

32. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением / В.А. Евстратов. – Харьков: Вища школа, 1981. – 248 с.

33. Островский В.П. Справочник конструктора по холодной штамповке / В.П. Островский. – М.: Машгиз, 1957. – 287 с.

34. Долгов В.А. Исследование методами моделирования напряженно-деформированного состояния универсально-сборных штампов: дисс... канд. техн. наук: 05.03.05 / В.А. Долгов. – Краматорск, 1971. – 176 с.

35. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.

36. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1968. – 283 с.

37. Исследование напряженно-деформированного состояния в зоне прижимного кольца при штамповке детали «днище» / Б. С. Каргин, А.А. Липчанский // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДДМА, 2014. – № 2 (39). – С. 129–133.

38. Экспериментальное исследование напряженного состояния блоков универсально-сборных переналаживаемых штампов методом голографической интерферометрии / Е. А. Фролов., В. В. Агарков, С. В. Корнеев // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 3 (32). – С. 218–223.

39. Пути управления полем напряжений в операциях листовой штамповки / Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузырь // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 4(33). – С. 100–105.

40. Конечно-элементное моделирование разделительных операций листовой штамповки / В. А. Луценко, П. В. Боровик, О. А. Коваленко // Обработка ма-

териалов давлением. – 2010. – № 3 (24). – С. 15–20.

41. Теорияковки и штамповки / Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др. / Под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1999. – 598 с.

42. К задаче формирования расчетных элементов технологических систем листовой штамповки / Н.А. Гоголь, О.В. Назарова, А.В. Ткачук и др. // Вестник НТУ „ХПИ”. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – № 47. – С.50–60.

43. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов штампов / Н.А. Гоголь, Н.А. Ткачук, О.П. Назарова // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2005. – № 31. – С. 103–108.

44. Демина Н.А. Влияние конструктивных и технологических параметров на напряженно-деформированное состояние матриц штампов холоднолистовой штамповки / Н.А. Демина // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – № 60. – С.68–76.

45. Численное моделирование процесса холоднолистовой штамповки / Н.А. Демина, О.П. Назарова, А.Д. Чепурной и др. // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – № 3. – С.70–79.

46. К вопросу о влиянии высоты матрицы штампа для вырубки-пробивки на ее деформированное состояние / Н.А. Демина, А.В. Ткачук, М.М. Пеклич и др. // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – № 33. – С. 28–33.

47. Демина Н.А. Контактное взаимодействие в сопряжении «пуансон – штампуемый материал – матрица» / Н.А. Демина, О.П. Назарова, А.Н. Ткачук // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – № 23. – С. 39–48.

48. Демина Н.А. Моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки / Н.А. Ткачук, Н.А. Демина, Ю.Д.Сердюк и др. // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр.. – Краматорск: ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 240–248.

49. Чекмадин А.С. К расчету напряженно-деформированного состояния при листовой штамповке / А.С. Чекмадин // Кузнечно-штамповочное производс-

тво. – 1987. – № 8. – С. 27–29.

50. К определению напряжений на режущих кромках вырезных твердосплавных матриц / С.М. Хмара, В.П. Смолянинов, А.А. Коломойцев и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 6. – С. 22–24.

51. Степанский Л.Г. Оценка стойкости пуансонов и матриц при холодной штамповке выдавливанием по условию усталостной прочности / Л.Г. Степанский // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – № 10. – С. 2–4.

52. Popat P.B. Finite -element analysis of the blanking process // Journal of Mechanical Working Technology / P.B. Popat, A. Ghosh, N.N. Kishore. – Amsterdam. – 1989. – 18. – № 3. – PP. 269–282.

53. Ghosh A. A new approach to the mechanics of the blanking operation: theoretical model and experimental verification / A. Ghosh, V. Raqhu Ram, P.B. Popat // Journal of Mechanical Working Technology. – 1985. – 11, № 2. – PP. 215–228.

54. Анализ результатов численного моделирования процесса вырубки-пробивки / Ю.Б. Гнучий, В.М. Смирнягин // Вестник Киевск. политехн. ин-та. – К.: Машиностроение, 1986. – № 23. – С. 12–22.

55. Закономерности распределения интенсивности напряжений и деформаций по пояску смятия при вырубке-пробивке / Ф.П. Михаленко, А.И. Гулиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – № 12. – С. 17–19.

56. Степанский Л.Г. Выбор материала инструмента для листовой и холодной объемной штамповки / Л.Г. Степанский // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2002. – № 12. – С. 18–22.

57. Трегубов В.И. Математическая модель нестационарного процесса вырубки осесимметричных заготовок из листового материала / В.И. Трегубов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2004. – № 2. – С. 7–12.

58. Напряженно-деформированное состояние вырубных матриц специализированных переналаживаемых штампов / А.И. Бых, Л.Г. Кузнецова, А.Я. Мовшович // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлени-

ем. – 2004. – № 8. – С. 30–33.

59. Исследование контактного взаимодействия пуансона со штампуемым материалом / Е. И. Заярненко, А.В. Ткачук, Н.А. Ткачук // ВОТ. Серия 2. – 1985. – Вып.10 (176). – С. 20–23.

60. Повышение износостойкости направляющих элементов универсально-сборных штампов / В.И. Денисов, И.Я. Мовшович // Технология и организация производства. – 1980. – № 1. – С. 28–30.

61. Неравномерность износа штампа при вырубке прямоугольных деталей / В.Н. Яворовский, И.А. Рощина // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2002. – № 4. – С. 23–28.

62. Влияние конструкции штампа на деформацию элементов блока и рабочего инструмента / А.Ф. Тарасов, С.А. Короткий // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тем. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С. 103–108.

63. Способ повышения стойкости штампов холодного деформирования штампов / В.К. Заблоцкий, М.Я. Белкин, А.И. Шимко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тем. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С. 109–113.

64. Методика определения формы и размеров поверхности контакта при моделировании процессов ОМД / А.В. Ахлестин, В.Н. Шевченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тем. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – С. 114–118.

65. Испытания прочности и жесткости базовых плит переналаживаемых штампов / Заярненко Е.И., Кузнецова Л.Г. // Вопросы оборонной техники. – 1990. – Сер. 2. – Вып.10 (229). – С.61–65.

66. Оценка деформируемости материала заготовок, полученных отделением методами пластического сдвига / В. А. Матвийчук, В. М. Михалевич, Л.И. Алиева // Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4 (37). – С 16–22.

67. Анализ вырубки прямоугольных пластинок методом конечных элемен-

тов / И.В. Бень, В.Н. Яворовский // Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4 (37). – С. 28–35.

68. Исследование специфического характера вырубki тонколистовых материалов с помощью компьютерного моделирования / В. Н. Яворовский, И. Н. Кальченко // Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4 (37). – С. 45–51.

69. Анализ нагружения заготовки при радиально-ротационном способе получения ободьев колес с измененной схемой внешнего воздействия / В. В. Драгобецкий, Р. В. Левченко, Р. Г. Пузырь // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 1 (30). – С. 146–150.

70. Расширение возможностей моделирования процесса сложной вытяжки / Драгобецкий В. В., Троцко О. В., Шлык С. В // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 2 (31). – С. 30–34.

71. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла по кромкам относительно тонких лент при их холодной прокатке / В. А. Федоринов., А. С. Чуруканов, К. Ю. Юрков и др. // Обработка материалов давлением. – 2011. – № 2 (27). – С. 62–65.

72. Корнилова А. В. Исследование рациональности применения сталей для изготовления инструмента холодной листовой штамповки на примере Х12МФ / А. В. Корнилова // Обработка материалов давлением. – 2010. – № 1 (22). – С. 159–166.

73. Регрессионно-математическое моделирование энергосиловых параметров процесса холодной прокатки / А. Ф. Тарасов, Г. В. Колесникова, А.М. Спаская и др. // Обработка материалов давлением. – 2010. – № 2(23). – С. 72–78.

74. Повышение технологических возможностей штамповой оснастки и точности деталей при П-образной гибке / Ю. А. Кочергин, А. Я. Мовшович, Е. А. Фролов // Обработка материалов давлением. – 2010. – № 3 (24). – С. 92–97.

75. Воронцов А.Л. Описание деформаций при анализе процессов обработки металлов давлением. Ч. 1. Степень деформации и накопленная деформация / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов

давлением. – 2013. – № 1. – С. 3–8.

76. Воронцов А.Л. Описание деформаций при анализе процессов обработки металлов давлением. // Часть 2. Выявление зон с различным деформированным состоянием / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013.– № 2. – С. 3–7.

77. Воронцов А.Л. Описание деформаций при анализе процессов обработки металлов давлением. Часть 3. Деформированное состояние и учет упрочнения при осадке и вдавливании в полупространство / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 3.

78. Разработка конструкторско-технологической модели детали для САПР ТП обработки металлов давлением / В.Г. Шибаков, Р.И. Мулюков, И.З. Вильданов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – №8 – С. 15–20.

79. Оценка вероятности разрушения заготовок и инструмента с помощью компьютерного моделирования / А.Ф. Фомичёв, А.В. Романов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – №8 – С. 20–25.

80. Упрочнение разделительных штампов тонкопленочными покрытиями / П.А. Тополянский, С.А. Ермаков, А.П. Тополянский // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – №7 – С. 27–39.

81. Aliieva L. Analysis of billet deformation during the combined radial-backward extrusion / L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zhbankov // New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering. – Czestochowa: Quick-druk, 2012. – P. 389–396.

82. Теоретический анализ деформированного состояния металла в местах изгиба до 180° / С. Ю. Плеснецов, О. И. Тришевский // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 4(1133) – С.77–86.

83. Закономірності формування механічних та структурних властивостей гомогенних та структурно-неоднорідних матеріалів в умовах великих пластич-

них деформацій зсуву / В. А. Тітов, Злочевська Н. К. // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 4(1133) – С.145–153.

84.Мовшович И.Я. Исследование параметров точности сборки универсально-сборной переналаживаемой оснастки / И.Я. Мовшович, Е.А. Фролов, О.В. Бондарь и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 5. – С. 17–21.

85. QForm 7 – новое слово в моделировании процессов обработки металлов давлением / Т. Элингхаузен, С.А. Стебунов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – № 2. – С.31–34.

86.Последовательность компьютерного моделирования комбинированных (статико-динамических) технологий машиностроения / В.А. Глушченков , И.А. Беляева // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18. –№ 4. – С. 76–81

87.Воронков А.В. Исследование штампуемости сварных листовых заготовок / А.В. Воронков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – №2. – С. 37–40

88.Система автоматизированного расчета технологических свойств металла в процессах разделительных операций листовой штамповки / В.Г. Шibaков, Д.Л. Панкратов, А.И. Виноградов и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – № 4. – С. 36–40.

89.Упрочнение разделительных штампов тонкопленочными покрытиями / П.А. Тополянский, С.А. Ермаков, А.П. Тополянский и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – №7. – С. 27–39

90.. Расчет температурных и силовых параметров локального деформирования трубчатой заготовки при фрикционном нагреве и влияние их на микроструктуру полученного изделия / И.С. Алиев, Е.Я. Пыц, Я. Е. Пыц // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – №4(1133). – С. 8–21.

91.Особенности проектирования процессов холодного выдавливания на

основе развития модульного подхода в рамках энергетического метода. / Л.И. Алиева, Н.С. Грудкина // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – №4(1133). – С.21–32.

92. Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В. А. Евстратов. – Харьков: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 144 с.

93. Проектирование процессов выдавливания в разъемных матрицах / Л.И. Алиева, А.И. Лобанов, Р.С. Борисов и др. // Известия Тульского государственного университета. Серия «Механика деформируемого твердого тела и ОМД». – Тула: ТулГУ, 2004. – Вып.2. – С. 132–139.

94. Закономірності формування механічних та структурних властивостей гомогенних та структурно-неоднорідних матеріалів в умовах великих пластичних деформацій зсуву / В.А. Тітов, Н. К. Злочевська // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – №4(1133). – С.145–153.

95. Визначення швидкості переміщення шарів металу і інтенсивності виділення тепла при чисельному рішенні задач нестационарної теплопровідності / О.І. Тришевський, М.В. Салтавець // Вісник НТУ «ХП», 2015. – №4(1133). – С.153–159.

96. Силові режими та формозміна металу при відбортуванні отворів у попередньо зпрофільованій заготовці в матриці з різним радіусом заокруглення / О.В. Калюжний, А.С. Пахолко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 43 (1086). – С.52-59.

97. Моделирование и анализ элементов технологических систем листовой штамповки / Г.И. Львов, Н.А. Ткачук // Механіка та машинобудування. – 1997. – № 1. – С.34-39.

98. Підвищення якості розділового тонколистового штампування / В. Я. Мірзак, В. М. Боков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 43 (1086). – С. 88–97.

99. Демина Н.А. К вопросу моделирования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки / Н.А. Демина // Вестник НТУ „ХПИ”. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2006. – № 24. – С.75–83.

100. Общий подход к конструкторско-технологическому обеспечению стойкости элементов штампов / Ю.Д.Сердюк, Н.А. Ткачук, Н.А.Демина // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: «Машиноведение и САПР». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. –№ 28. – С. 92–102.

101. Лисин А.Г. Определение напряжений на режущей кромке штампа методом линий скольжения / А.Г. Лисин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1964. – № 3. – С. 20–22.

102. Касьянов В.А. Напряжения в паяных твердосплавных пуансон-матрицах / В.А. Касьянов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – № 11. – С. 17–19.

103. К расчету нагрузок на режущие кромки рабочих частей штампов для чистовой вырубki / В.П. Смолянинов, И.Я. Камышов // Вестник Харьковского политехн. института. – Харьков, 1985. – № 225. – С. 56–58.

104. Gierzynska-Dolna M. The mechanism of wear of blanking dies and the methods of increasing of their durability / M. Gierzynska-Dolna // Leszyty Naukowe. – Krakow. – 1987. – № 110. – С. 181–186.

105. Расчет контактного взаимодействия рабочих деталей при листовой штамповке методом граничных элементов / Е.И. Заярненко, Г.Л. Хавин // Динамика и прочность машин. – Харьков: ХГУ – Вища школа, 1988. – Вып.41. – С. 7–11.

106. Валиев Р.Ш. Метод расчета и оптимизация конструкций матриц для штамповки сложнопрофильных деталей: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» / Р.Ш. Валиев. – Уфа, 2007. – 18 с.

107. Алиев И. С. Расчет температурных и силовых параметров локального деформирования трубчатой заготовки при фрикционном нагреве и влияние их

на микроструктуру полученного изделия / Алиев И. С. , Пыщ Е.Я., Пыщ Я. Е. // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 4 (1133). – С. 8–21.

108. Ковка и штамповка: справочник в 4 т. / Под ред. Е. И. Семенова [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – Т.3: Холодная объемная штамповка; [под ред. Г. А. Навроцкого]. – 1987. – 384 с.

109. Аксенов Л.Б. Системное проектирование процессов штамповки / Л.Б. Аксенов.– Л.: Машиностроение, 1990.–

110. Систематизация информации для разработки процессов выдавливания в разъемных матрицах / И. С. Алиев, А. И. Лобанов, О. К. Савченко // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: Сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2001. – С. 194–198.

81 Aliieva L. Analysis of billet deformation during the combined radial-backward extrusion / L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zhbankov // New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering. – Czestochowa: Quick-druk, 2012. – P. 389–396.

111. Математичне моделювання елементів нових технологічних процесів прокатки / О. І. Тришевський, М. В. Салтавець // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 43 (1086). – С. 175–183.

112. Определение контактных давлений на режущие кромки матрицы и пуансона при чистовой вырубке / В.П. Смолянинов, И.Я. Камышов, О.А. Чегринец // Обработ.металлов давл. в машиностроении. –Харьков. – 1985. – № 21. – С. 48–50.

113. Kinematics of Metal Flow during Twist Extrusion Investigated with a New Experimental Method / Beygelzimer Y., A. Reshetov, S. Synkov, O. Prokof'eva, R. Kulagin // Journal of materials processing technology. – 2009. – No 209. – P. 3650–3656/

114. Анализ разделительных процессов листовой штамповки / В.К. Бори-

севич, В. В. Драгобецкий // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2009. – № 12. – С. 9–12.

115. Z. Multicriteria shape design of a sheet contour in stamping / F.-Z. Oujebbour, A. Habbal, R. Ellaia, Z. Zhao // Journal of Computational Design and Engineering. – 2014. – Vol. 1. – No. 3. – P. 187–193.

116. Zhang L.C. A new mechanics model of stamping a thin strip on an elastic foundation/ L.C. Zhang, Zhongqin Lin // International Journal of Solids and Structures. – 1997. – No. 34(3). – P. 327–339.

117. Kardes N. Determining the flow stress curve with yield and ultimate tensile strengths. Part I / N. Kardes, C. Choi, X. Yang, T. Altan // STAMPING Journal. – May/June. – 2011. – P. 12–13.

118. Kardes N. Determining the flow stress curve with yield and ultimate tensile strengths. Part II / N. Kardes // STAMPING Journal. – July/August. – 2011. – P. 14–15.

115. Oujebbour F.-Z. Multicriteria shape design of a sheet contour in stamping / F.-Z. Oujebbour, A. Habbal, R. Ellaia, Z. Zhao // Journal of Computational Design and Engineering. – 2014. – Vol. 1. – No. 3. – P. 187–193.

119. Liu W. Multi-objective optimization of sheet metal forming process using Pareto-based genetic algorithm / Liu W., Yang Y. // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – No. 208(1). – P. 499–506.

120. An heuristic optimization algorithm for the blank shape design of high precision metallic parts obtained by a particular stamping process/ Azaouzi M., Naceur H., Delamézière A., Batoz J.L., Belouettar S. // Finite Elements in Analysis and Design. – 2008. – No. 44(14). – P. 842–850.

121. Lin B.T. Application of an integrated CAD/CAE/ CAM system for stamping dies for automobiles / Lin B.T, Kuo C.C. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – No. 35(9–10). – P. 1000–1013.

122. Hamdaoui M. POD surrogates for real-time multi-parametric sheet metal forming problems / Hamdaoui M/, Le Quilliec G., Breitkopf P., Villon P. //

International Journal of Material Forming. – 2013. – P. 1–22.

123. Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 1. Постановка задачи. 2. Кинематическая модель контакта гладких тел / Н.Н. Ткачук, И.Я. Мовшович, Н.А. Ткачук и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО "Тисо Принт", 2014. – № 3. – С. 3–10.

124. 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 / Н.Н.Ткачук, И.Я. Мовшович, Н.А. Ткачук и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО "Тисо Принт", 2014. – № 4. – С. 3–8

125. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО "Тисо Принт", 2014. – № 6. – С. 10–16

126. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости (продолжение) / Ткачук Н.Н., Чепурной А.Д., Скрипченко Н.Б. и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО "Тисо Принт", 2014. – № 7. – С. 11–20.

127. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости (окончание) / Ткачук Н.Н., Чепурной А.Д., Скрипченко Н.Б. и др.. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. М.: ООО "Тисо Принт", 2014. – № 8. – С. 6–8.

128. Глушченков В.А. Технологические схемы гибридных и комбинированных технологий листовой штамповки, сочетающих статическое и динамическое

кое нагружения / В.А. Глушников // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – № 8. – С. 20–25.

129. Методы граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд. – М.: Мир, 1987. – 328 с.

130. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

131. Kuich G. Applications of the Boundary Elements Method to Contact Problem / G. Kuich // Proc. BETEC 86. Computational Mechanics Publications. – 1986. – P. 488–519.

132. A new boundary element scheme for the elastic contact analysis / N. Kamiya, T. Nishiki // Contact Mechanics II. Computational Techniques. CMP. Southampton, Boston. – 1995. – P. 225–232.

133. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров / А.С. Кравчук // Доклады АН СССР, 1976. – Т.230. – № 2. – С. 308–310.

134. Численное решение геометрически нелинейных контактных задач / А.С. Кравчук, В.А. Суряков // Доклады АН СССР, 1981. – Т. 259. – № 6. – С. 1327–1329.

135. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров / А.С. Кравчук // Прикл. мат. и мех. – 1977. – Т.41. – Вып.2. – С. 329–337.

136. Wriggers P. Computational Contact Mechanics / P. Wriggers. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – 518 p.

137. Wriggers P. Contact Constraints within Coupled Thermomechanical Analysis – A Finite Element Model / P. Wriggers, C. Miehe // Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng. – 1994. – Vol. 113. – P. 301–319.

138. Contact-Impact by the Pinball Algorithm with Penalty and Lagrangian Methods / T. Belytschko, M.O. Neal // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. – 1991. – Vol. 31. – P. 547–572.

139. Wohlmuth B. A mortar finite element method using dual spaces for the Lagrange multiplier / B. Wohlmuth // *SIAM J. Numer. Anal.* – 2000. – Vol. 38 (3). – P. 989–1012.

140. Design of energy conserving algorithms for frictionless dynamic contact problems / T.A. Laursen, V. Chawla // *International Journal for Numerical Methods in Engineering.* – 1997. – Vol. 40. – P. 863–886.

141. Zienkiewicz, O. C. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals [Text]* / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu. – 7th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann. – 2013. – 756 p.

142. Jiang Pledgers O. Combined Lagrangian Multiplier and Penalty Function Finite Element Technique for Elastic Impact Analysis / O. Jiang Pledgers // *Computers and Structures.* – 1988. – Vol. 30. – P. 1219–1229.

143. Wriggers H. Finite Element Formulation of Large Deformation Impact-Contact Problems with Friction / H. Wriggers, Van Vu, J. Stein // *Computers and Structures.* – 1990. – Vol. 37. – P. 319–331.

144. Cescotto S. Large Strain Dynamic Analysis Using Solid and Contact Finite Elements Based on a Mixed Formulation - Application to Metalforming / S. Cescotto, Y.Y. Zhu // *Journal of Metals Processing Technology.* – 1994. – Vol. 45. – P. 657–663.

145. Nackenhorst U. An adaptive finite element method to analyse contact problems / U. Nackenhorst // *Contact Mechanics II. Computational Techniques.* Computational Mechanics Publications. Southampton, Boston. – 1995. – P. 241–248.

146. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной и др. // *Механіка та машинобудування.* – 2006. – №1. – С.57–79.

147. Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения. / Н.А. Ткачук, С.Т. Бруль, А.Н. Малакей и др. // *Механіка та маши-*

нобудування. – 2005. – № 1. – С.184–194.

148. Расчеты на прочность вырубных матриц и пуансон-матриц для листовой штамповки / Е.И. Заярненко, Н.А. Ткачук, А.В. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990.– № 12. – С. 18–21.

149. Исследование напряженного состояния вырубных пуансонов УСПШ // В сб.: Прогрессивная технология, переналаживаемая оснастка и инструмент. Мат. отрасл. науч.-техн. семинара / Е.И. Заярненко, А.В. Ткачук, Н.А. Ткачук. – Харьков. – 1985. – С. 95–103.

150. Анализ чувствительности прочностных и динамических характеристик машиностроительных конструкций на основе прямого возмущения конечно-элементных моделей / Н.А.Ткачук, А. Ю. Танченко, А.Н. Ткачук и др. // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – № 22. – С. 147–169.

151. Ткачук Н.Н. Расчетно-экспериментальная идентификация математических и численных моделей взаимодействия элементов сложных механических систем / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко и др. / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО "Тиссо Принт", 2014. – №2. – С.3–9.

152. Экспресс – модели и экспресс – системы для оперативного решения задач анализа и синтеза элементов сложных механических систем / Н.А. Ткачук, Е.А. Орлов, В.И. Головченко и др. // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: «Машиноведение и САПР». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – № 53. – С.116–137.

153. Методы определения прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем / Н.А. Ткачук, Н.А. Демина, А.Н. Ткачук и др. // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2006. – Вип.36. – С.155–164.

154. Метод обобщенного параметрического описания моделей элементов штамповой оснастки / Н.А. Демина, Н.А. Ткачук // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: «Машиноведение и САПР». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 2. – С.71–79.

155. Скворцов Г.Д. Основы конструирования штампов для листовой штамповки. 2-е изд. перераб и доп./ Скворцов Г.Д. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

156. 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" / С. О. Короткий – Краматорськ, 2010. – 20 с.

157. Расчет напряженно-деформированного состояния в элементах штампов с использованием пакета конечно-элементного анализа COSMOS/Works / А.Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. М.: ООО "Тисо Принт", 2004. – № 8. – С. 27–30.

158. Комплексный подход к проектированию технологии и штамповой оснастки для листовой штамповки / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ, 2005. – № 17. – С. 308–313.

159. Влияние конструкции штампа на деформацию элементов штампового блока и рабочего инструмента штампа / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. М.: ООО "Тисо Принт", 2006. – № 2.– С. 34–37.

160. Методологические принципы математического моделирования штампов для листовой штамповки / Мовшович А.Я., Заярненко Е.И., Кузнецова Л.Г. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. М.: ООО "Тисо Принт", 2006. – № 2.– С. 26–30.

161. Короткий С. А. Моделирование и экспериментальное исследование упругих деформаций штамповой оснастки / С. А. Короткий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ: 2008. – № 23. – С. 148–153.

162. Моделирование разделительных операций на основе оценки степени использования ресурса пластичности материала в среде системы конечно-

элементного анализа ABAQUS / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні: наук. журнал. – Запоріжжя: 2010. – № 1. – С. 114–117.

163. Конструкции и технологические возможности специализированных переналаживаемых гибочных штампов / А.Я. Мовшович, Ю.А. Кочергин // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія "Машинобудування". – 2010. – № 60. – С. 250–254.

164. Мовшович А.Я. Система универсально-сборных штампов для листовой штамповки / А.Я. Мовшович. – М.: Машиностроение, 1980. – 177 с.

165. Обратимая технологическая оснастка для ГПС / Жолткевич Н.Д., Мовшович А.Я., Горбулин В.П. [др.]. – К.: Техника, 1992. – 215 с.

166. 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.

167. Исследование точности изготовления и сборки блоков специализированных переналаживаемых штампов для гибки деталей / А.Я. Мовшович, Н.Д. Жолткевич, Н.К. Резниченко и др. // Вестник НТУ "ХПИ". – 2010. – № 43. – С. 135–140.

168. К вопросу повышения износостойкости рабочих элементов штампов / А.Я. Мовшович, А.В. Ряховский, В.В. Косенко // Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2013, вип. 2(35). – С. 154–157.

169. Корнилова А.В. Разработка методов обеспечения долговечности силовых деталей кузнечно-прессовых машин и инструмента: дисс... доктора. техн. наук: спец. 05.03.05 / А.В. Корнилова. – Москва, 2009. – 314 с.

170. Абхари П. Б. Разработка штампов для выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари, Л. И. Алиева, И. С. Алиев и др. // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДДМА, 2016. – № 1(42). – С. 223–231.

171. Методика расчета и проектирования процессов выдавливания в разь-

ёмных матрицах / Л.И. Алиева, Р.С. Борисов, И.Г. Савчинский // Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej, V miezddzynarodowa konferencja naukowa: Seria Metalurgia, nr 39. – Czestohowa: Wipmifs, 2004. – С. 383–391.

172. Washizu K. Variational Methods in Elasticity and Plasticity / Washizu K. – Oxford etc.: Pergamon Press, 1982. – 342 p.

173. Сокольников И.С. Тензорный анализ (теория и применения в геометрии и в механике сплошных сред) / И.С. Сокольников. – М.: Наука, 1971. – 376 с.

174. Прикладная механика деформируемого твердого тела / Колтунов М.А., Кравчук А.С., Майборода В.П. – М.: Высш. школа, 1983. – 349 с.

175. Карманов В. Г. Математическое программирование. – М.: Наука, 1980. – 258 с.

176. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики / Г.И. Марчук. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. – 536 с.

177. Анализ чувствительности прочностных и динамических характеристик машиностроительных конструкций на основе прямого возмущения конечно-элементных моделей / Н.А.Ткачук, А. Ю. Танченко, А.Н. Ткачук и др. // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: «Машиноведение и САПР». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – № 22. – С. 147–169.

178. Контактное взаимодействие сложнопрофильных деталей машиностроительных конструкций с учетом локальной податливости поверхностного слоя: монография. / Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.А., и др. // – Харків: ФОП Панов А.Н., 2017. – 148 с.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача:

в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Расчетно-экспериментальное исследование элементов штамповой оснастки / Н. А. Ткачук., О. А. Ищенко, Н. Н.Ткачук и др. // Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии, 2017. № 3 (24Е). С. 11-19. ISSN 2219-7869.

Автором на прикладі штампів для розділювальних операцій листової штамповки здійснено порівняння напружено-деформованого стану і розподілів контактної тиску, які отримані експериментальним шляхом методом контактних відбитків та в ході комп'ютерного моделювання.

2. Ищенко О.А. 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. – 2011. – №1. – С.38–42.

Автором на основі застосування методу параметричного моделювання проведено варіювання граничних умов при розрахунку напружено-деформованого стану елементів штампів

3. Формирование комплексных расчетных моделей элементов штампов для разделительных операций / Ищенко О.А., Ткачук А.В., Грабовский А.В., Демина Н.А. // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип.: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 12 (1184).–С.23–30. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.04. – Режим доступу: <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/article/view/2413-4295.2016.12.04>

Автором сформульовані комплексні розрахункові моделі елементів розділових штампів

4. Ищенко О.А. 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. – Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, 2012. – №2(31). – С. 221–226.

Автором поставлена задача про вплив геометричних параметрів базових плит на їх напружено-деформований стан, проведено розрахунки, проаналізовано результати досліджень, а також сформульовані висновки та рекомендації

5. Ищенко О.А. 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. Наук. фах. видання. – Мелитополь, 2006. – Вып.36. – С.141–149.

Автором розроблений підхід до визначення силової взаємодії у складних механічних системах

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.

Автором здійснено аналіз контактної взаємодії елементів розділових штампів

7. Ищенко О.А. 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.

Автором з метою визначення міцнісних та жорсткісних характеристик елементів розділових штампів здійснено моделювання напружено-деформованого стану базових плит

8. Ищенко О.А. Формирование комплексных расчетных моделей элементов штампов для разделительных операций / О.А. Ищенко, Н.А. Ткачук,

Г.А. Кротенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2012. – № 47 (953). – С. 34–38.

Автором здійснено формування комплексних розрахункових моделей елементів розділових штампів

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

Автором розроблено методологію досліджень контактної взаємодії за умови контакту системи тіл

10.Ищенко О.А. 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. – 2011. – № 51. – С. 50–59.

Автором здійснено розробку параметричних моделей базових плит розділових штампів для аналізу напружено-деформованого стану із урахуванням контактної взаємодії

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

Автором визначено контактні зони та розподіли контактного тиску при взаємодії пружних тіл методикою експериментальних досліджень із застосуванням чутливих до тиску плівок для випадку контакту призматичного тіла із тонколистовим матеріалом.

12.Ищенко О. А. 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

Автором здійснено аналіз впливу властивостей фіксуючого матеріалу на напружено-деформований стан базових плит та колонок розділових штампів

13.Ищенко О.А. 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, 2006. – Вип.43. – С.30–37.

Автором здійснений розвиток підходів до аналізу напружено-деформованого стану елементів складних механічних систем шляхом розширення можливостей розрахунково-експериментальних досліджень

14.Ищенко О.А. Контактное взаимодействие элементов штампов для разделительных операций / О.А. Ищенко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя: Запорізь. 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, <https://drive.google.com/file/d/0B58M3iphitDVWjFxFxUDJZazRhbkU/view>
Автором розробила параметричні моделі для комп'ютерного моделювання контактної взаємодії штампового оснащення

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. – 2017. – № 5(1227). – С. 108–134. – Режим доступу: <http://library.kpi.kharkov.ua/files/>

Vestniki/2017_5.pdf

Автором здійснено комп'ютерне моделювання контактної взаємодії елементів штампового оснащення.

17. Контактна взаємодія елементів штампового оснащення / М. А. Ткачук, О. А. Іщенко, 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

Автором розроблена комплексна математична модель, яка дає можливість враховувати множинну контактну взаємодію елементів досліджуваних технологічних систем, а також здійснено дослідження напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення.

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.

Автором на основі системного підходу до проектування елементів технологічних систем сформульована задача розрахунково-експериментального дослідження верстатних пристосувань; на прикладі пристосувань для фрезерних верстатів продемонстровано можливість забезпечення високої їх жорсткості.

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 «ХП». Тем. вип.: Машинознавство та

САПР. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – № 22. – С. 147–169.

Автором поставлено та розв'язано задачу про контактну взаємодію спряжених тіл

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 «ХП». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – №3. – С. 88–100.

Автором запропоновано застосування параметричних моделей до дослідження напружено-деформованого стану складних просторових конструкцій

ДОДАТОК Б

Апробація результатів дисертаційної роботи на міжнародних конференціях

1. XVII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» 20-22 травня 2009 р. м. Харків, заочна форма участі.
2. Международная научно-техническая конференция «Университетская наука-2010» 2010 р. м. Мариуполь ПГТУ, заочна форма участі.
3. XX міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» 5-17 травня 2012 р. м. Харків, очна форма участі.
4. XXII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» 29-31 травня 2013 р. м. Харків), очна форма участі
5. XXII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» 21-23 травня 2014 р. м. Харків, заочна форма участі.
6. VII международная. научно-техническая конференция «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии» 18-20 ноября 2015 г. м. Харьков, очна форма участі.
7. XXIV міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» 18-20 травня 2016 р. м. Харків, заочна форма участі
8. VIII міжнародна науково-технічна конференція «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні і металургії» 23-25 листопада 2016 р. м. Харків, очна

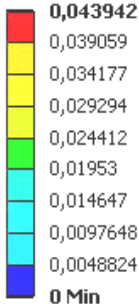
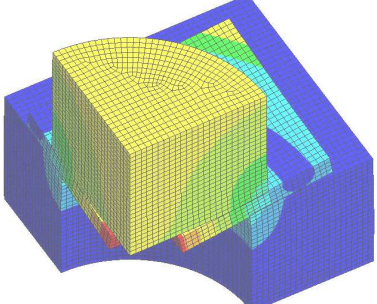

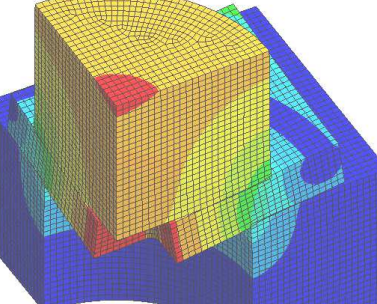
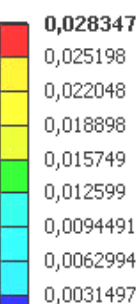
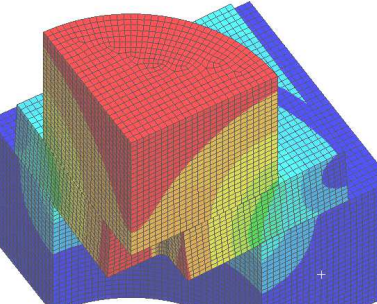
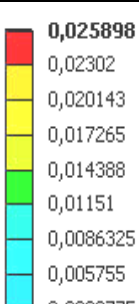
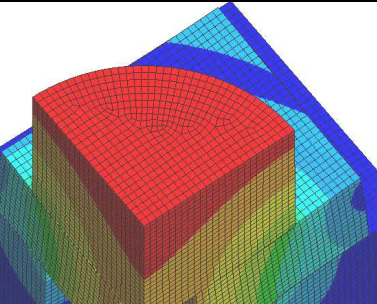
форма участі.

9. XXV міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я » 16-18 травня 2018 р. м. Харків, заочна форма участі.

ДОДАТОК В

Ілюстративний матеріал стосовно розподілів компонент напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення

Таблиця В.1 – Розподіл повних переміщень у досліджуваній системі "блок – базова плита – підштамова плита" при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
170	15	0,043	 <p>0,043942 Max 0,039059 0,034177 0,029294 0,024412 0,01953 0,014647 0,0097648 0,0048824 0 Min</p>	
	30	0,034	 <p>0,03431 Max 0,030498 0,026685 0,022873 0,019061 0,015249 0,011437 0,0076244 0,0038122 0 Min</p>	
	45	0,0283	 <p>0,028347 Max 0,025198 0,022048 0,018898 0,015749 0,012599 0,0094491 0,0062994 0,0031497 0 Min</p>	
	60	0,0258	 <p>0,025898 Max 0,02302 0,020143 0,017265 0,014388 0,01151 0,0086325 0,005755 0,0028775 0 Min</p>	

Закінчення табл. В.1

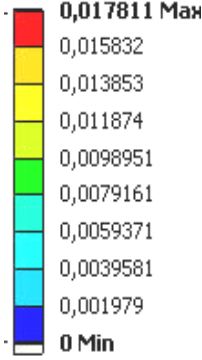
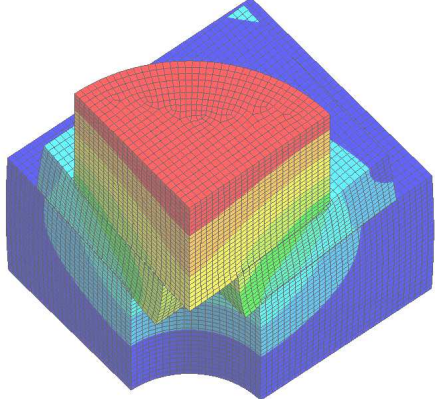
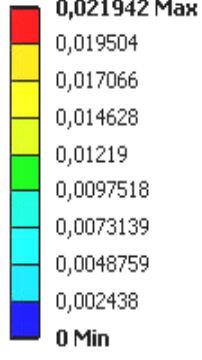
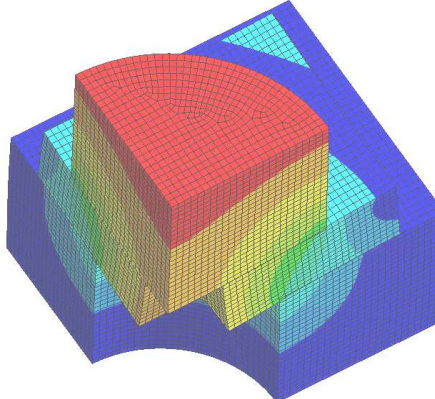
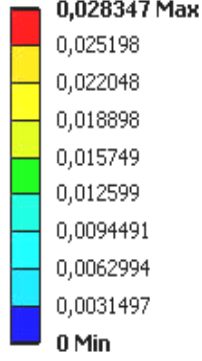
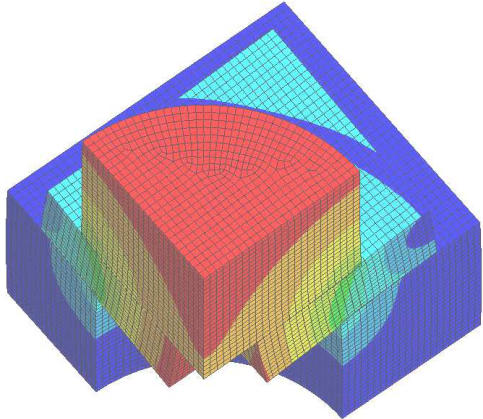
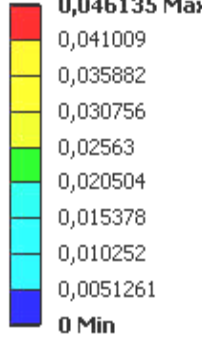
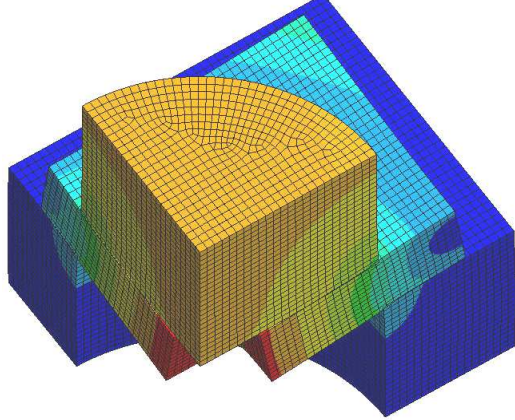
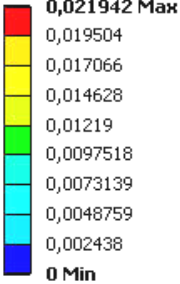
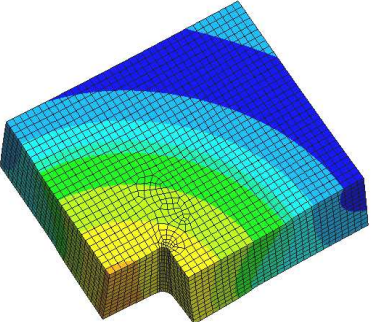
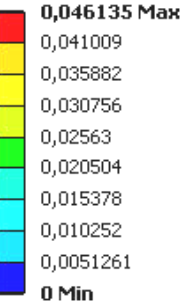
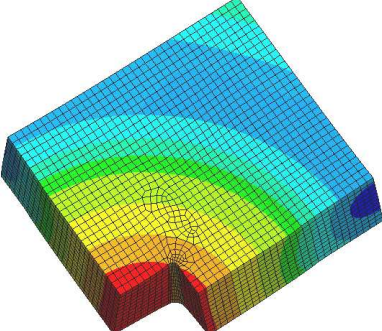
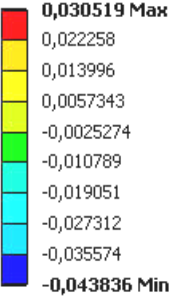
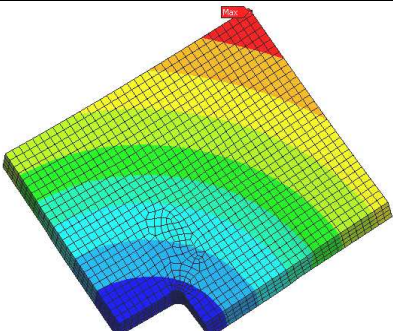
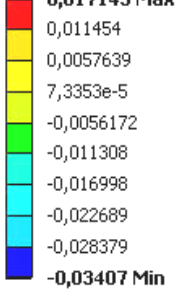
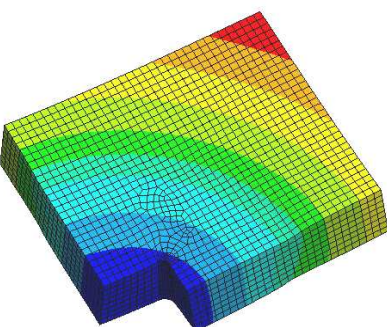
D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
100	45	0,0178		
140		0,021		
170		0,028		
200		0,046		

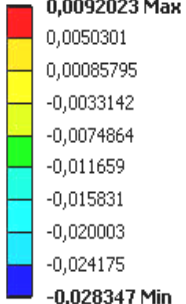
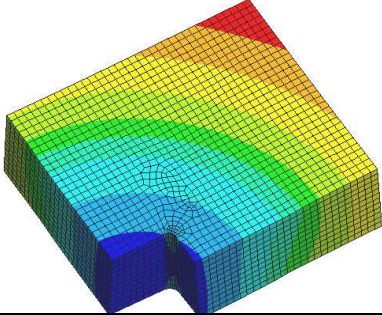
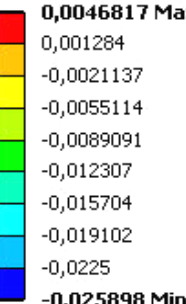
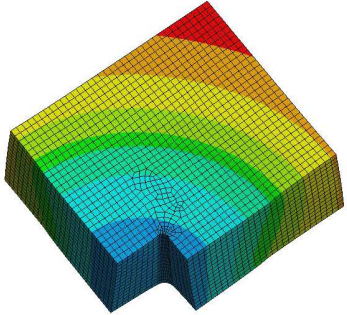
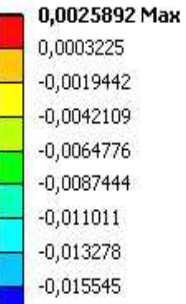
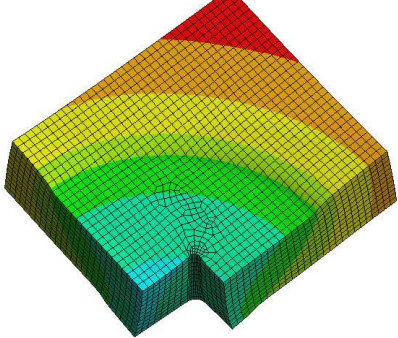
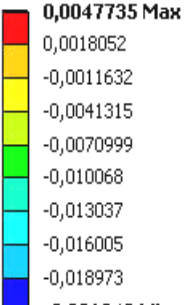
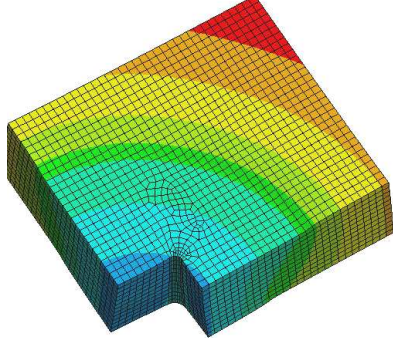
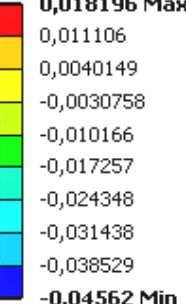
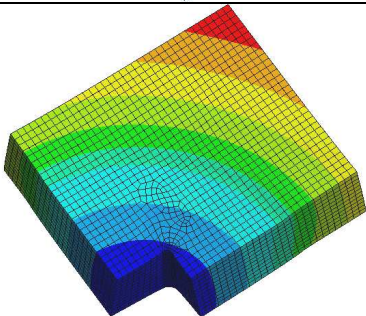
Таблица В.2 – Розподіл повних переміщень у базовій плиті при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
170	15	0,043		
	30	0,034		
	45	0,0283		
	60	0,0258		
100	45	0,017		

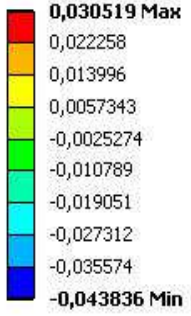
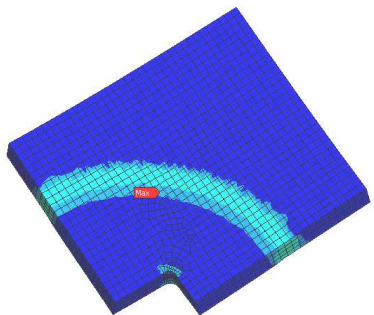
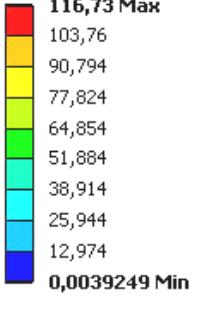
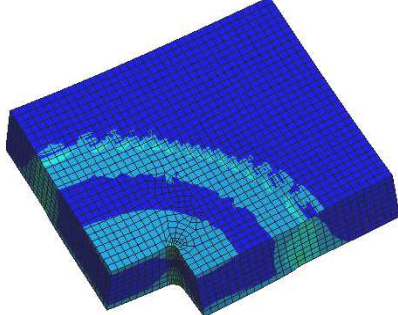
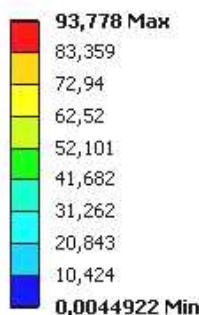
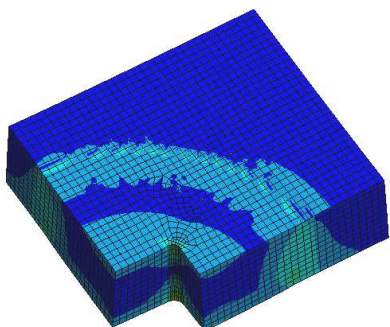
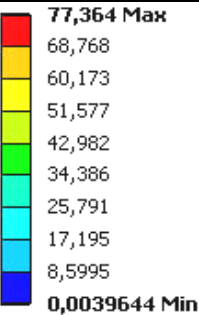
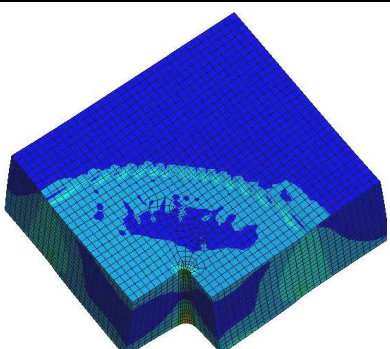
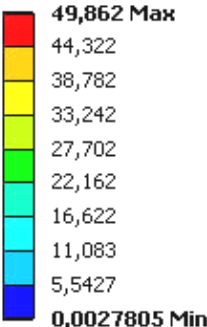
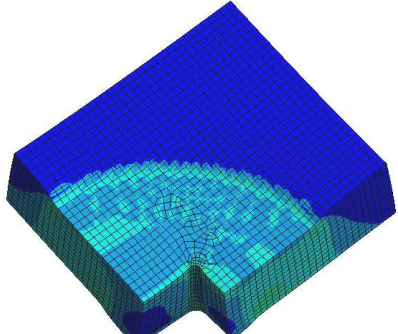
D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
140	45	0,021		
		0,046		

Таблиця В.3 – Розподіл осьових переміщень у базовій плиті при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу осьових переміщень
170	15	0,031; -0,043		
		0,0171; -0,03407		

D (мм)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу осьових переміщень
170	45	0,0092; -0,0283		
	60	0,0046; -0,025мм		
100	45	0,0178; -0,0025		
140		0,0047; -0,021		
200		0,0181; -0,0045		

Таблиця В.4 – Розподіл еквівалентних (за Мізесом) напружень у базовій плиті при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу еквівалентних за Мізесом напружень
170	15	142,9	 <p>0,030519 Max 0,022258 0,013996 0,0057343 -0,0025274 -0,010789 -0,019051 -0,027312 -0,035574 -0,043836 Min</p>	
	30	116,73	 <p>116,73 Max 103,76 90,794 77,824 64,854 51,884 38,914 25,944 12,974 0,0039249 Min</p>	
	45	93,77	 <p>93,778 Max 83,359 72,94 62,52 52,101 41,682 31,262 20,843 10,424 0,0044922 Min</p>	
	60	77,364	 <p>77,364 Max 68,768 60,173 51,577 42,982 34,386 25,791 17,195 8,5995 0,0039644 Min</p>	
100	45	49,86	 <p>49,862 Max 44,322 38,782 33,242 27,702 22,162 16,622 11,083 5,5427 0,0027805 Min</p>	

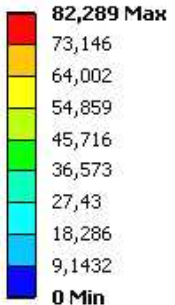
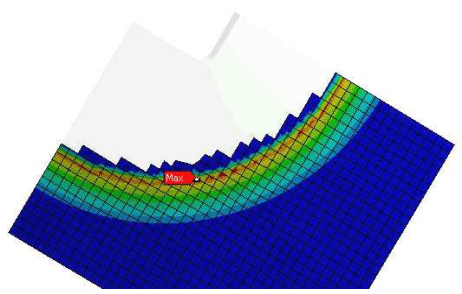
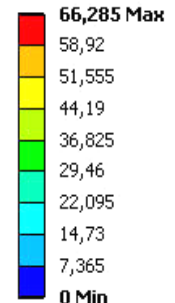
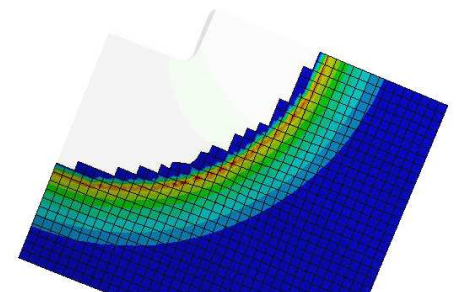
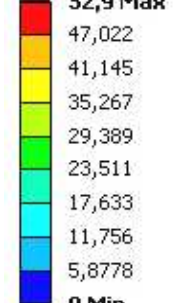
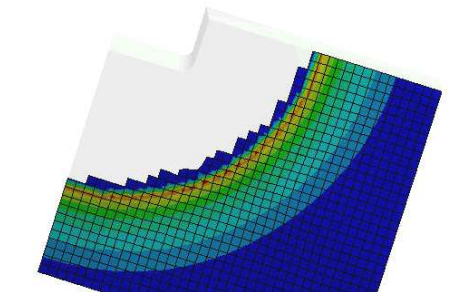
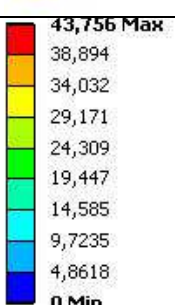
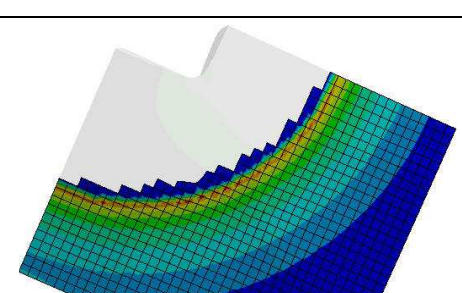
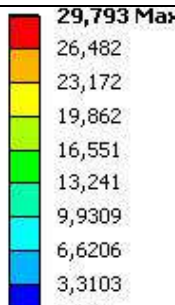
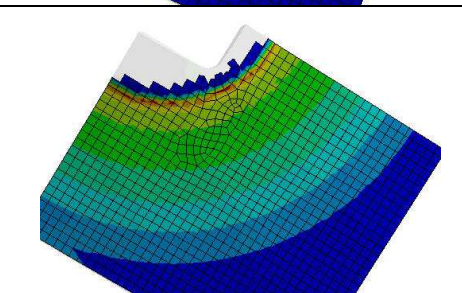
D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу еквівалентних за Мізесом напружень
140	45	79,917		

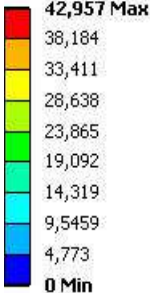
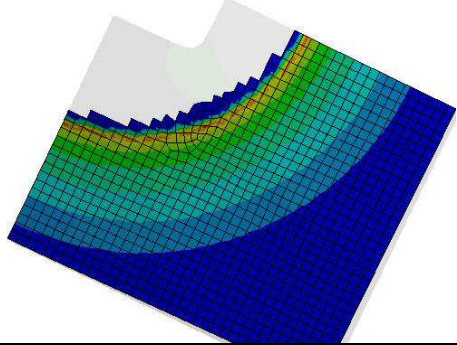
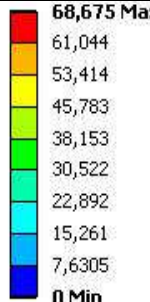
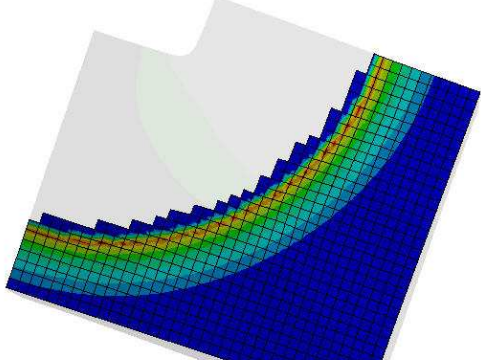
Таблиця В.5 – Розподіл осьових нормальних напружень у базовій плиті при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу осьових нормальних напружень
170	15	22,471 ; -146,6		
	30	19,031; - 119,53		

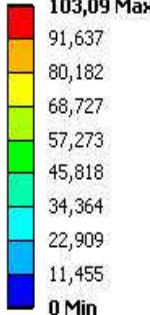
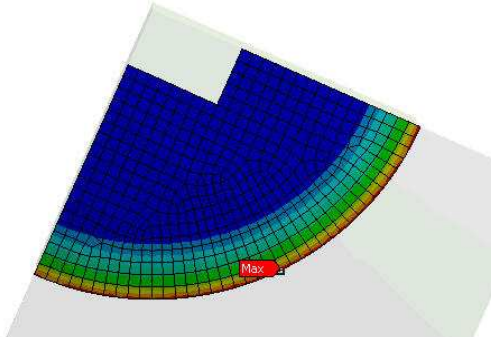
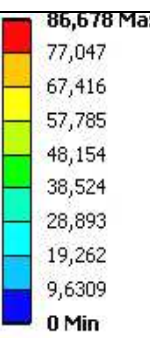
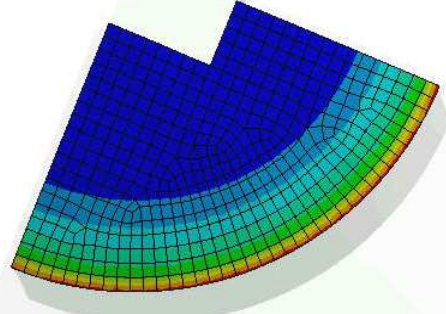
D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу осевих нормальних напружень
170	45	16 ; -95,48		
	60	13,782 ; -78,23		
100	45	19,46 ; -56,138		
140		12,2 ; -81,68		
200		21,82 ; -133,88		

Таблиця В.6 – Розподіл контактної тиску у зонах контактної взаємодії елементів досліджуваної системи "базова плита – підштампова плита" при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
170	15	82,2		
	30	66,2		
	45	52,9		
	60	43,75		
100	45	29,7		

D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
140	42,9	42,9		
				

Таблиця В.7 – Розподіл контактної тиску у зонах контактної взаємодії елементів досліджуваної системи "пакет – базова плита" при різних значеннях товщини нижньої базової плити h (див. рис. 4.1)

D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
170	15	103,09		
				

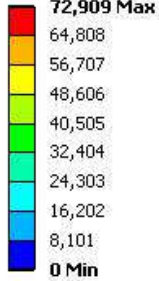
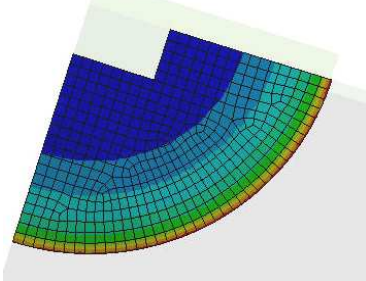
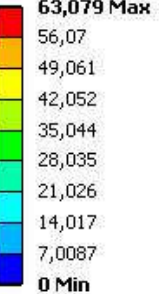
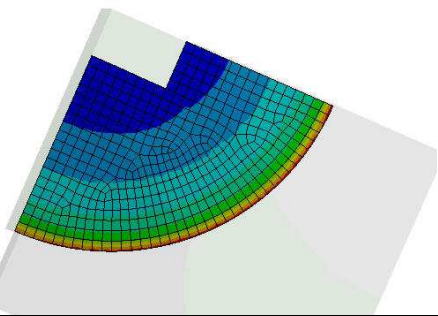
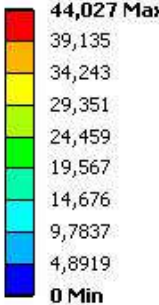
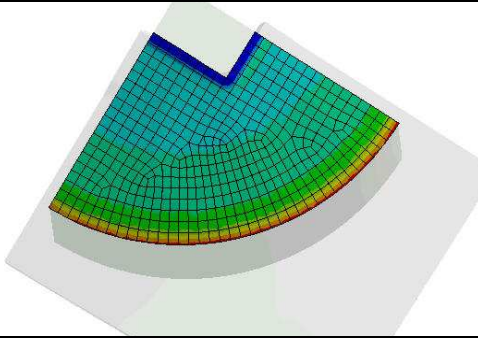
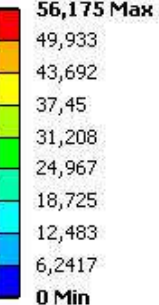
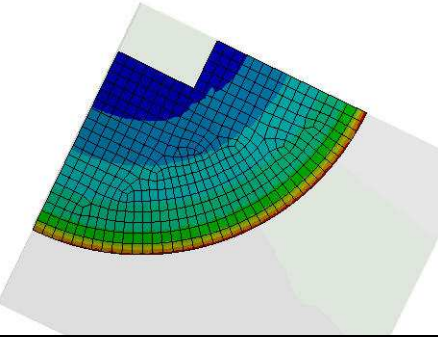
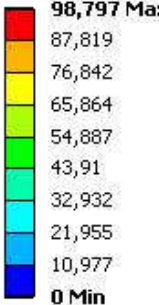
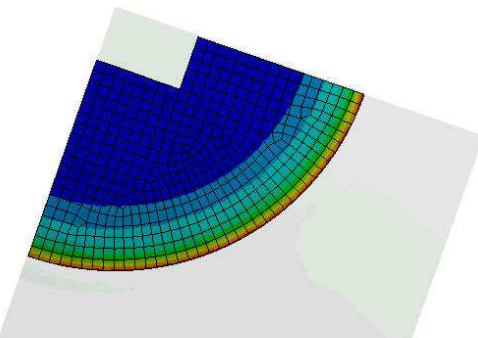
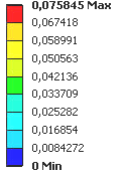
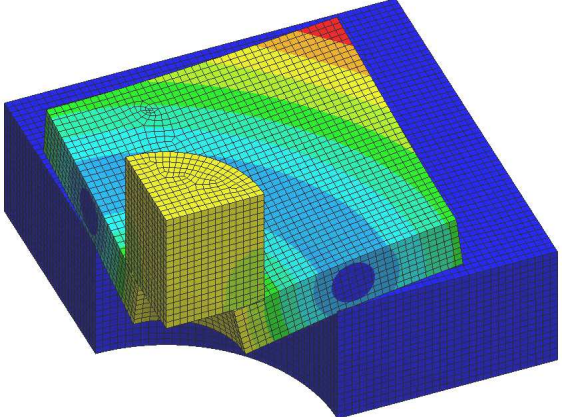
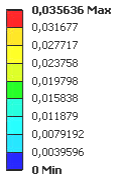
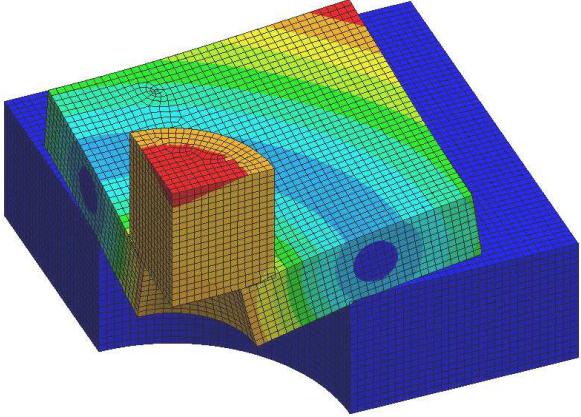
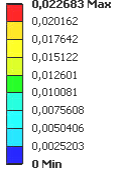
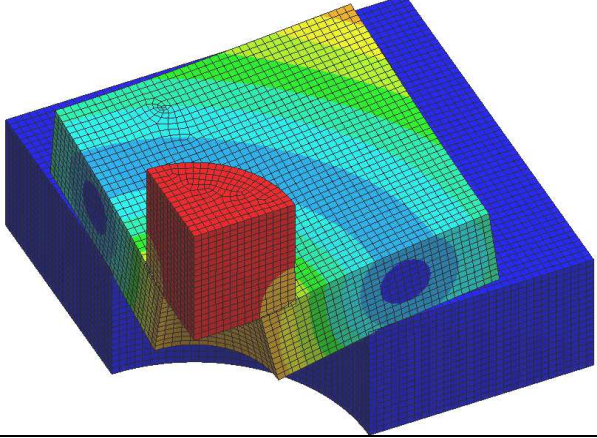
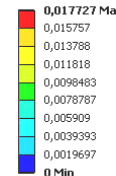
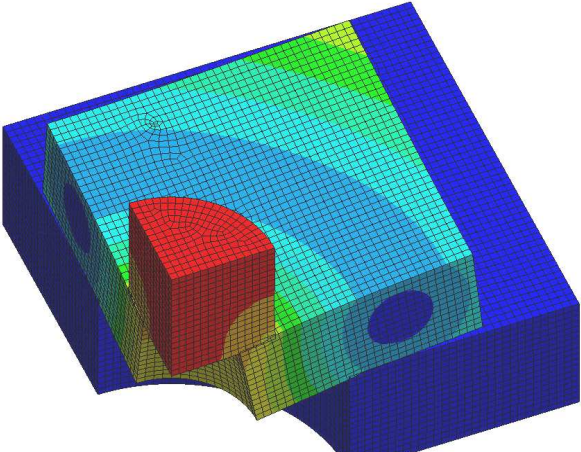
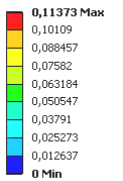
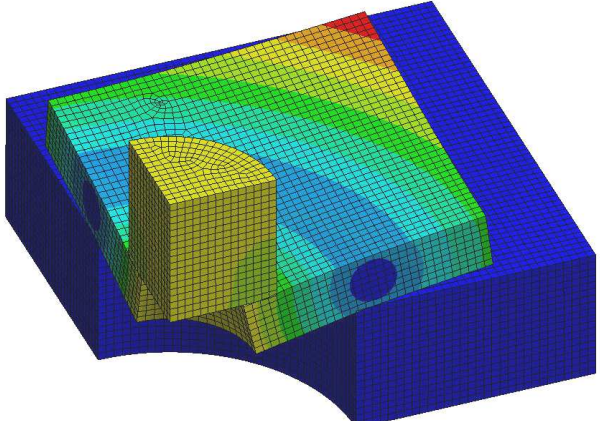
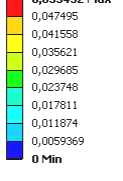
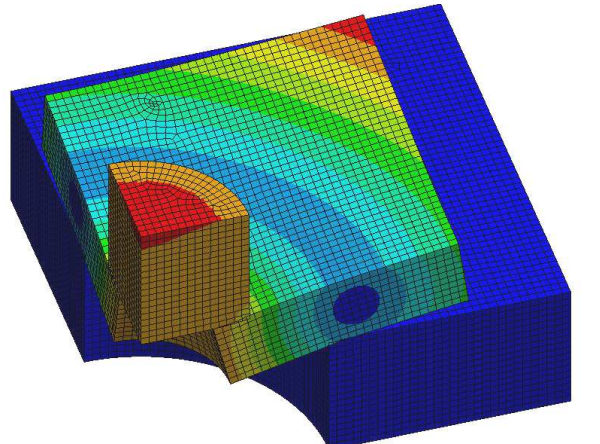
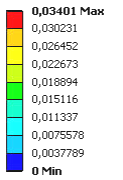
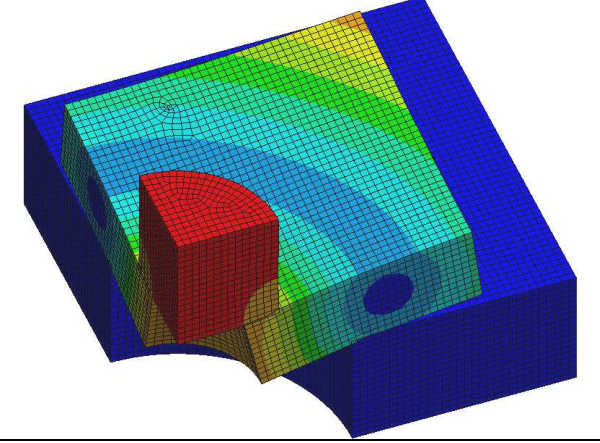
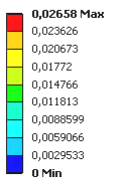
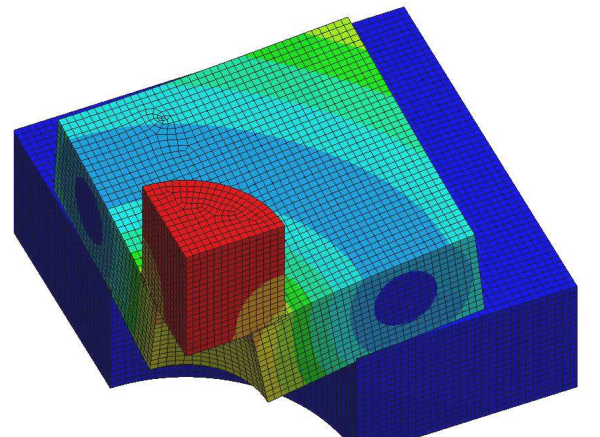
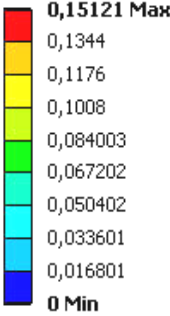
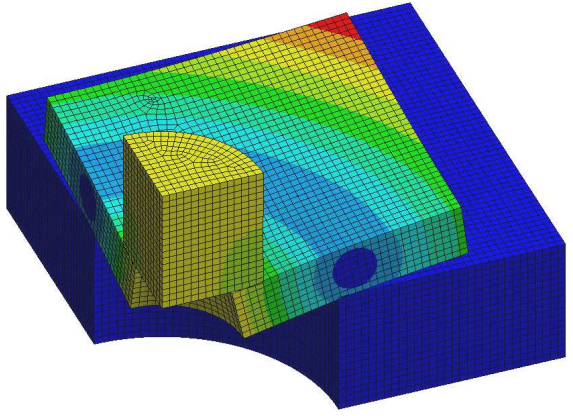
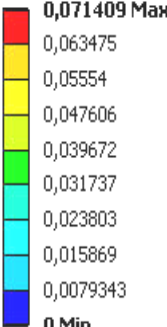
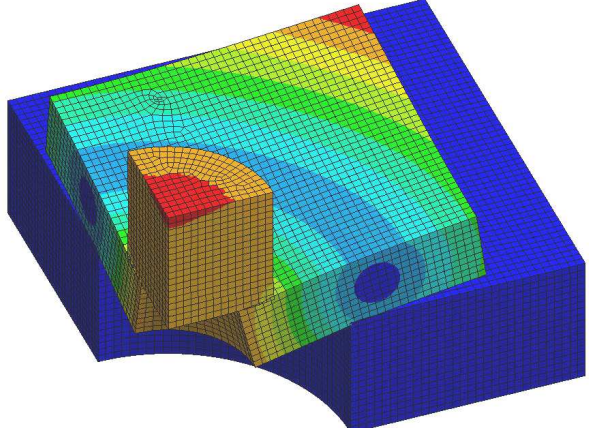
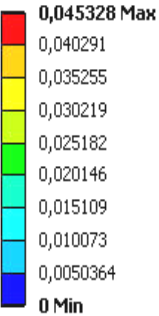
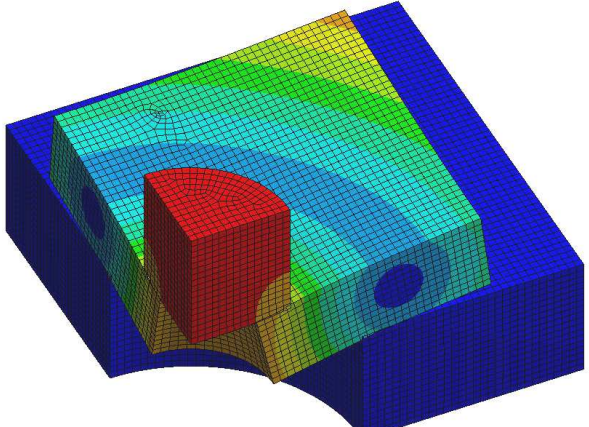
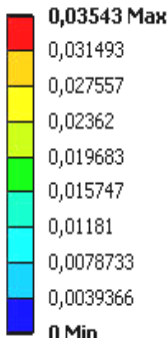
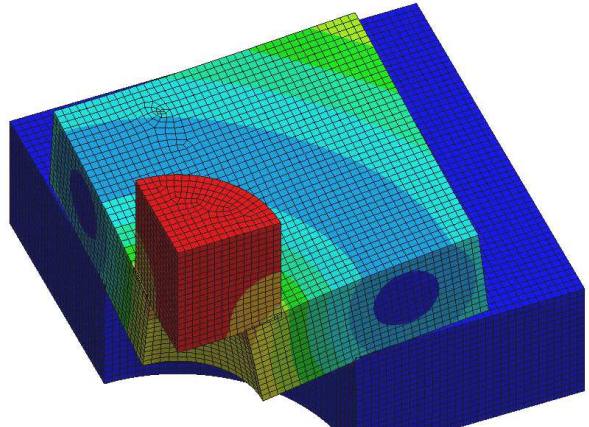
D (мм)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
170	45	72,9		
	60	63,07		
100	45	44,02		
140		56,17		
200		98,79		

Таблица В.8 – Розподіл повних переміщень у досліджуваній системі "блок – базова плита – підштампова плита"

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
15	11	0,037	<p>0,037949 Max</p> <p>0,033733</p> <p>0,029516</p> <p>0,0253</p> <p>0,021083</p> <p>0,016866</p> <p>0,01265</p> <p>0,0084332</p> <p>0,0042166</p> <p>0 Min</p>	
	14	0,017	<p>0,017833 Max</p> <p>0,015851</p> <p>0,01387</p> <p>0,011889</p> <p>0,0099072</p> <p>0,0079257</p> <p>0,0059443</p> <p>0,0039629</p> <p>0,0019814</p> <p>0 Min</p>	
	17	0,011	<p>0,011348 Max</p> <p>0,010087</p> <p>0,0088262</p> <p>0,0075653</p> <p>0,0063044</p> <p>0,0050435</p> <p>0,0037827</p> <p>0,0025218</p> <p>0,0012609</p> <p>0 Min</p>	
	20	0,0088	<p>20.03.2017 16:59</p> <p>0,0088661 Max</p> <p>0,007881</p> <p>0,0068959</p> <p>0,0059107</p> <p>0,0049256</p> <p>0,0039405</p> <p>0,0029554</p> <p>0,0019702</p> <p>0,00098512</p> <p>0 Min</p>	

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
30	11	0,075		
	14	0,035		
	17	0,022		
	20	0,017		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
	11	0,11	 <p>0,11373 Max 0,10109 0,088457 0,07582 0,063184 0,050547 0,03791 0,025273 0,012637 0 Min</p>	
45	14	0,053	 <p>0,053432 Max 0,047495 0,041558 0,035621 0,029685 0,023748 0,017811 0,011874 0,0059369 0 Min</p>	
	17	0,034	 <p>0,03401 Max 0,030231 0,026452 0,022673 0,018894 0,015116 0,011337 0,0075578 0,0037789 0 Min</p>	
	20	0,0265	 <p>0,02658 Max 0,023626 0,020673 0,01772 0,014766 0,011813 0,0088599 0,0059066 0,0029533 0 Min</p>	

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
60	11	0,15	 <p>0,15121 Max 0,1344 0,1176 0,1008 0,084003 0,067202 0,050402 0,033601 0,016801 0 Min</p>	
	14	0,071	 <p>0,071409 Max 0,063475 0,05554 0,047606 0,039672 0,031737 0,023803 0,015869 0,0079343 0 Min</p>	
	17	0,045	 <p>0,045328 Max 0,040291 0,035255 0,030219 0,025182 0,020146 0,015109 0,010073 0,0050364 0 Min</p>	
	20	0,0354	 <p>0,03543 Max 0,031493 0,027557 0,02362 0,019683 0,015747 0,01181 0,0078733 0,0039366 0 Min</p>	

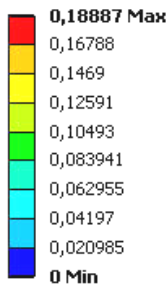
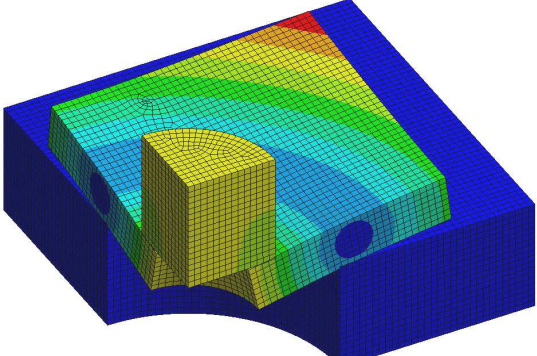
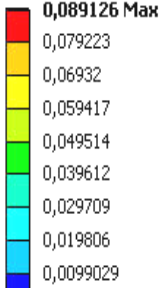
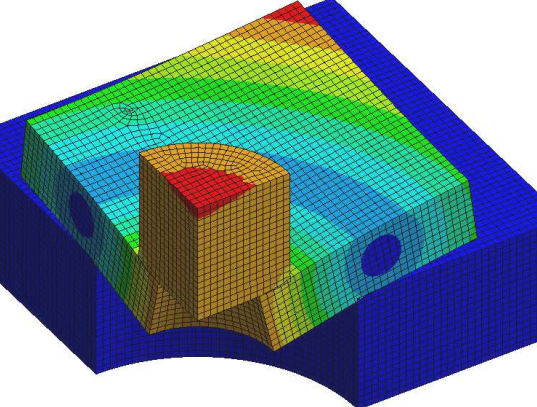
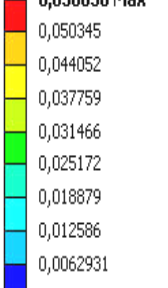
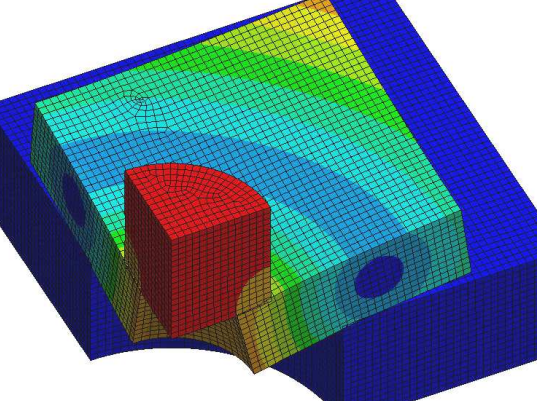
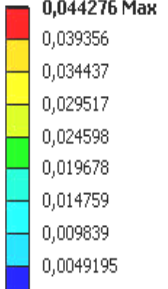
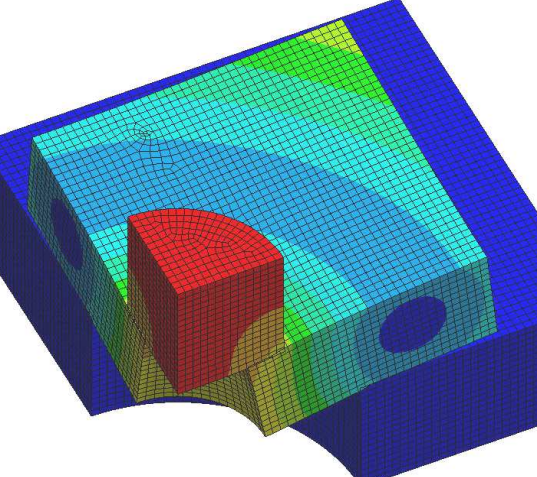
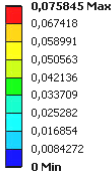
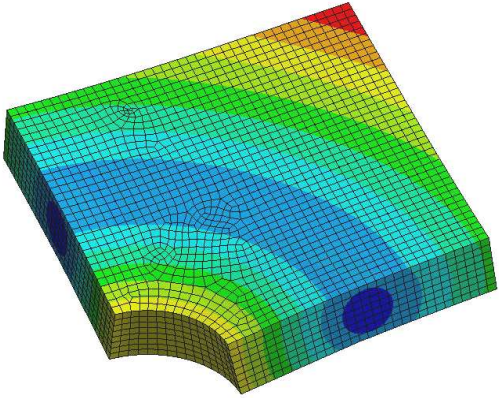
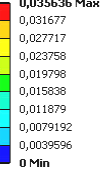
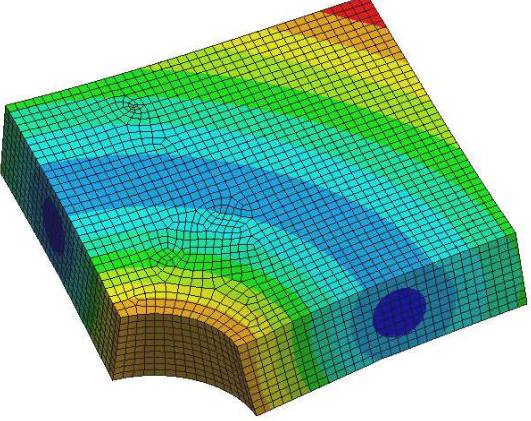
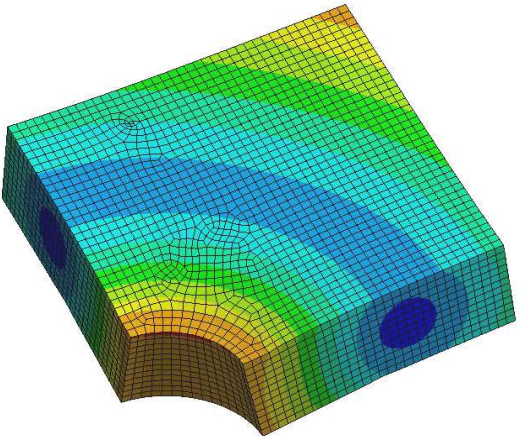
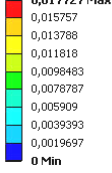
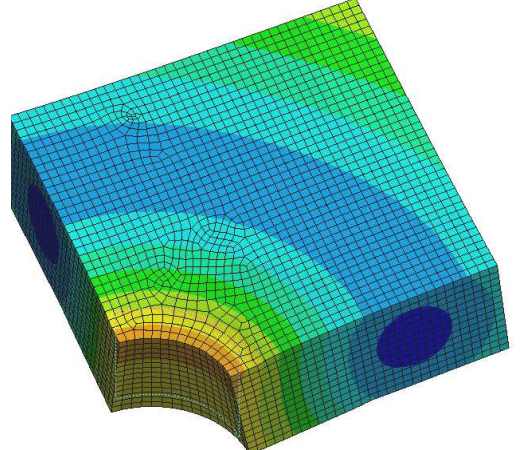
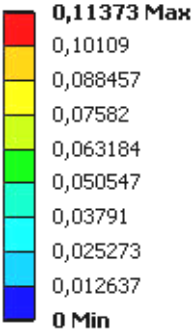
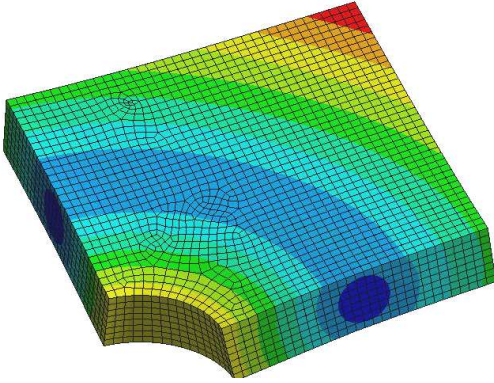
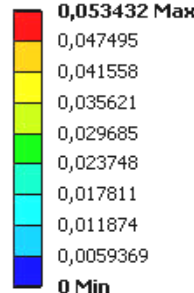
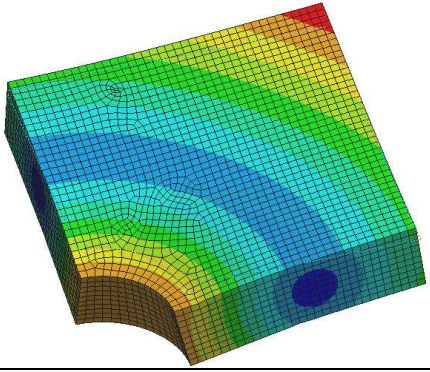
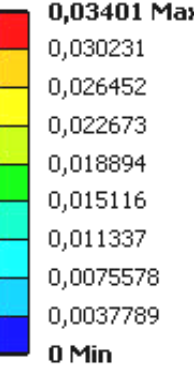
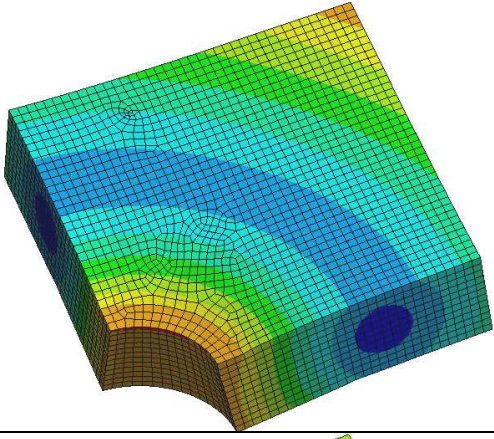
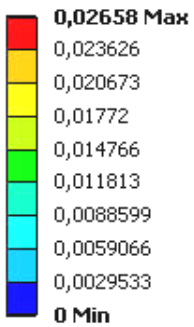
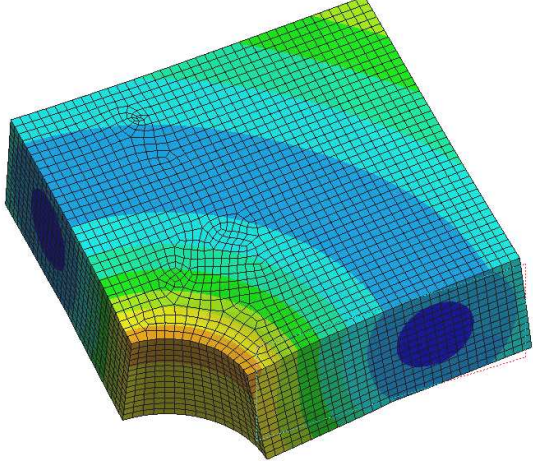
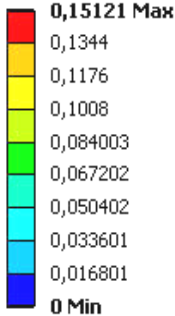
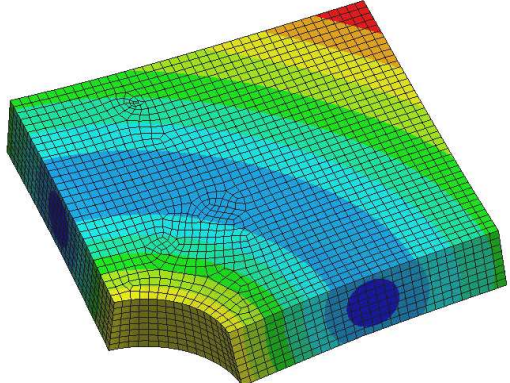
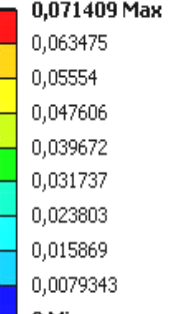
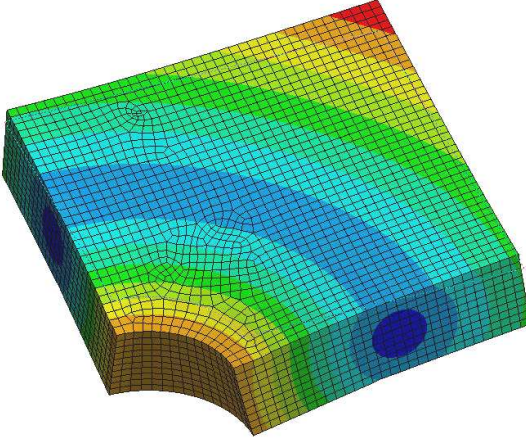
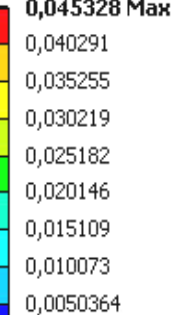
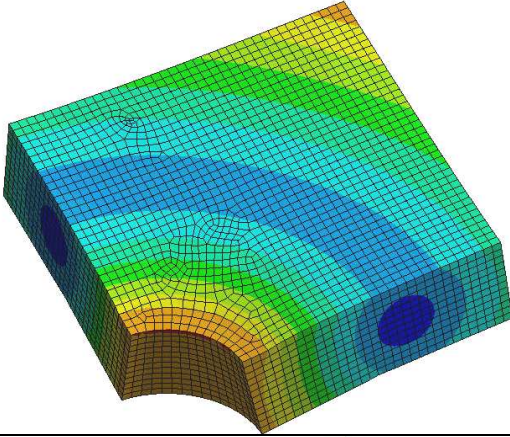
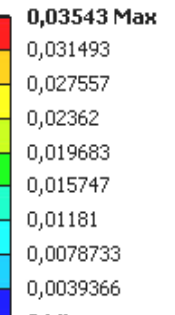
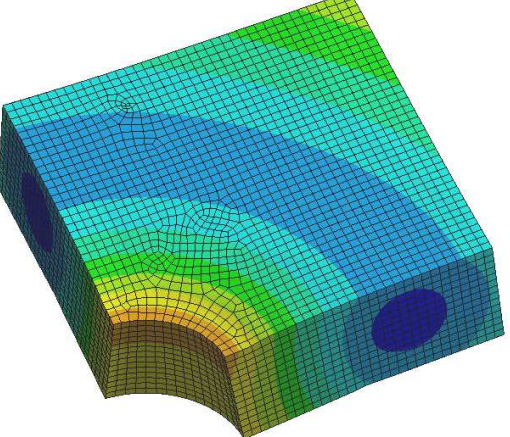
Р _{шт} (кН)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
75	11	0,188		
	14	0,089		
	17	0,056		
	20	0,0442		

Таблица В.9 – Розподіл повних переміщень у базовій плиті

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
15	11	0,037		
	14	0,017		
	17	0,011		
	20	0,00088		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина тах (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
	11	0,075	 <p>0,075845 Макс 0,067418 0,058991 0,050563 0,042136 0,033709 0,025282 0,016854 0,0084272 0 Min</p>	
	14	0,035	 <p>0,035636 Макс 0,031677 0,027717 0,023758 0,019798 0,015838 0,011879 0,0079192 0,0039596 0 Min</p>	
30	17	0,022		
	20	0,017	 <p>0,017727 Макс 0,015757 0,013788 0,011818 0,0098483 0,0078787 0,005909 0,0039393 0,0019697 0 Min</p>	

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величин а max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
45	11	0,11		
	14	0,053		
	17	0,034		
	20	0,0265		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина тах (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
60	11	0,15	 <p>0,15121 Max 0,1344 0,1176 0,1008 0,084003 0,067202 0,050402 0,033601 0,016801 0 Min</p>	
	14	0,071	 <p>0,071409 Max 0,063475 0,05554 0,047606 0,039672 0,031737 0,023803 0,015869 0,0079343 0 Min</p>	
	17	0,045	 <p>0,045328 Max 0,040291 0,035255 0,030219 0,025182 0,020146 0,015109 0,010073 0,0050364 0 Min</p>	
	20	0,0354	 <p>0,03543 Max 0,031493 0,027557 0,02362 0,019683 0,015747 0,01181 0,0078733 0,0039366 0 Min</p>	

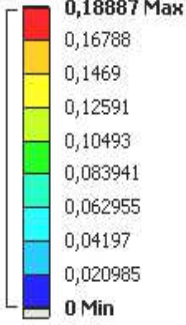
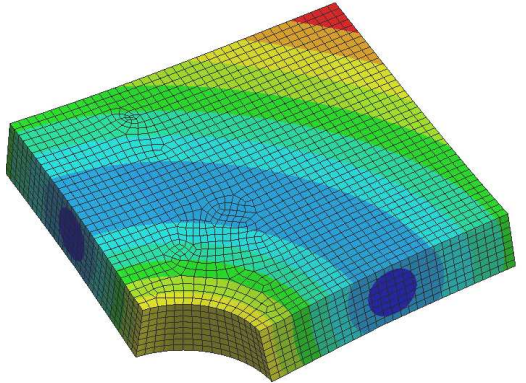
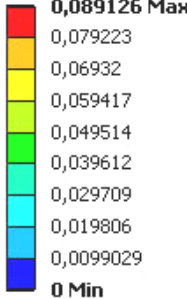
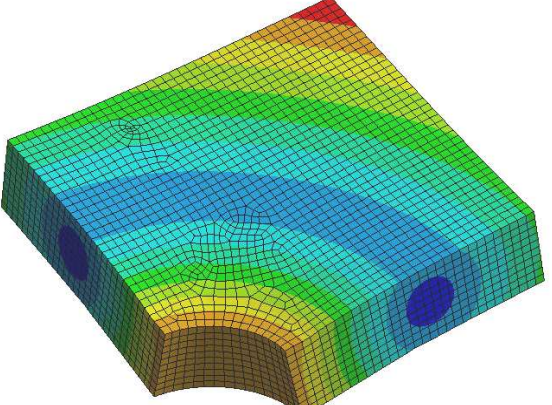
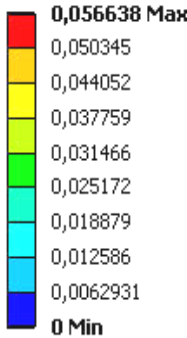
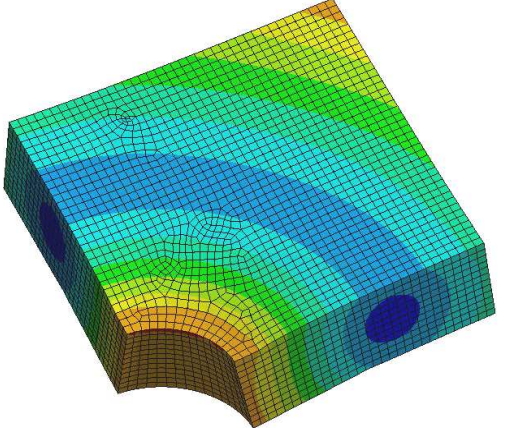
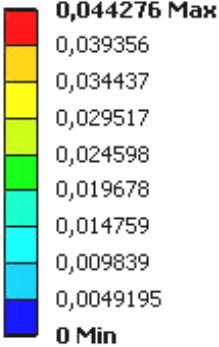
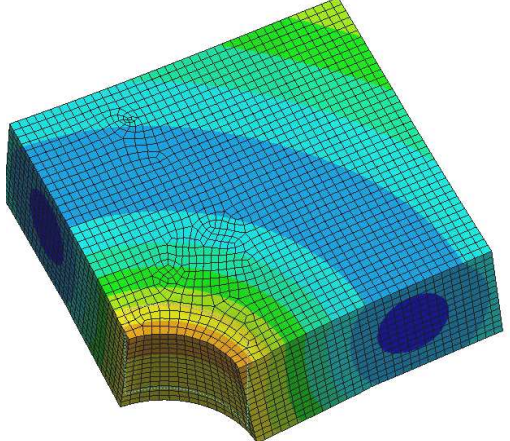
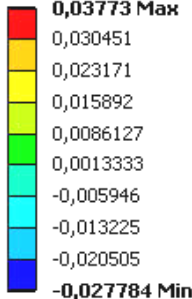
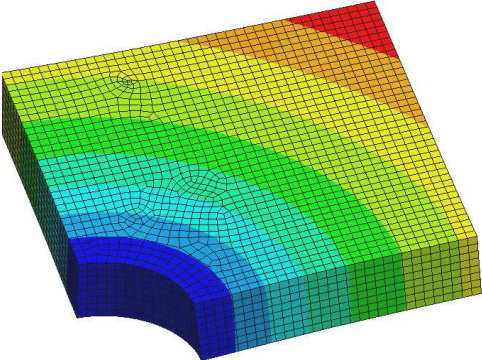
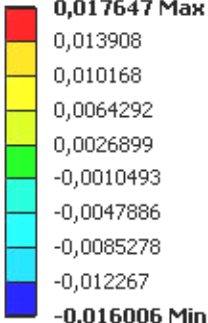
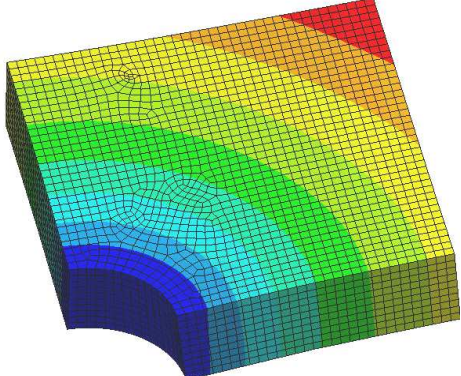
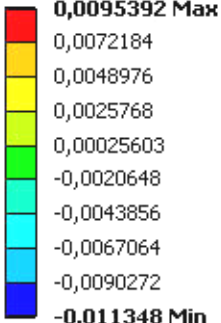
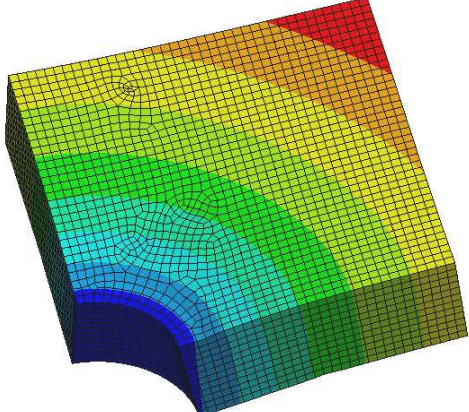
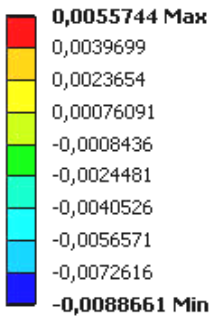
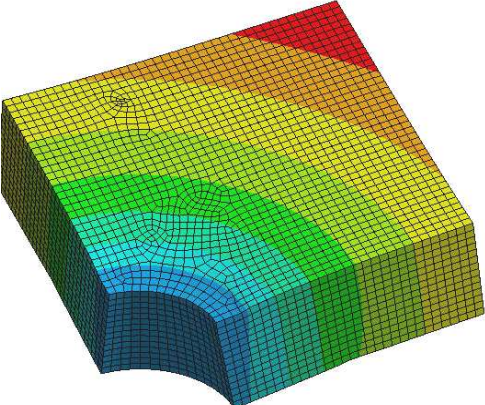
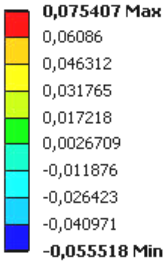
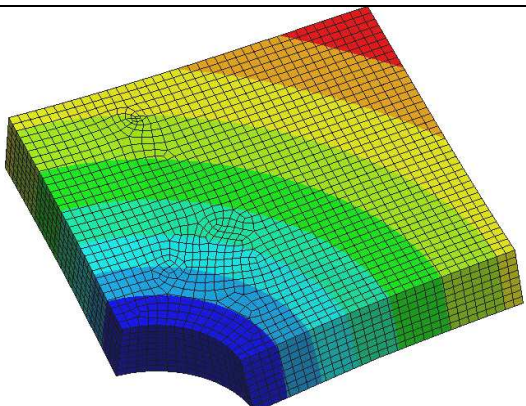
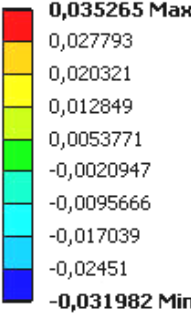
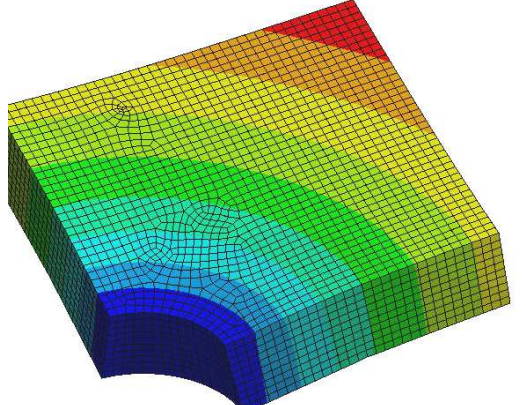
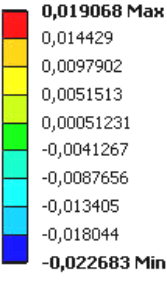
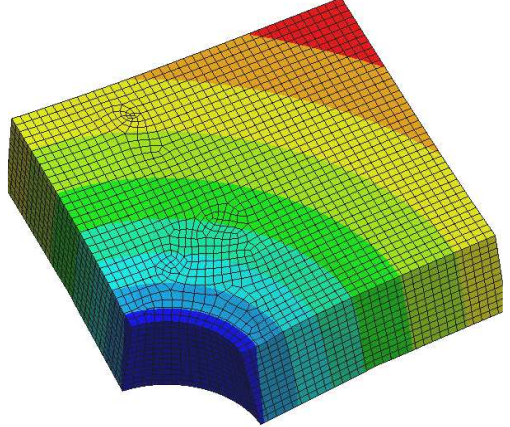
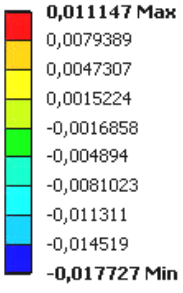
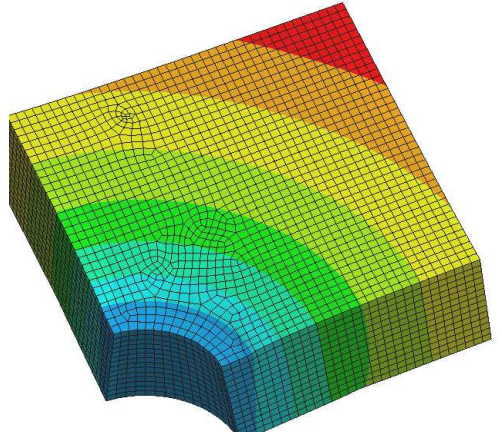
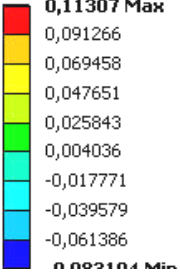
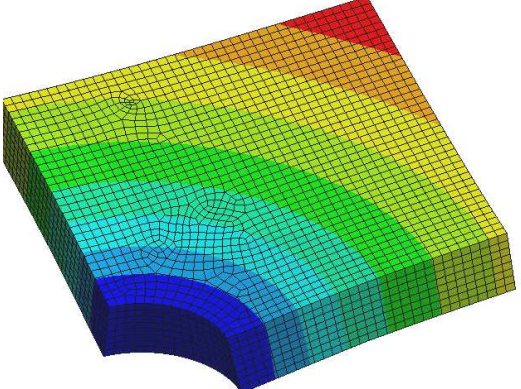
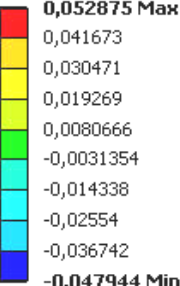
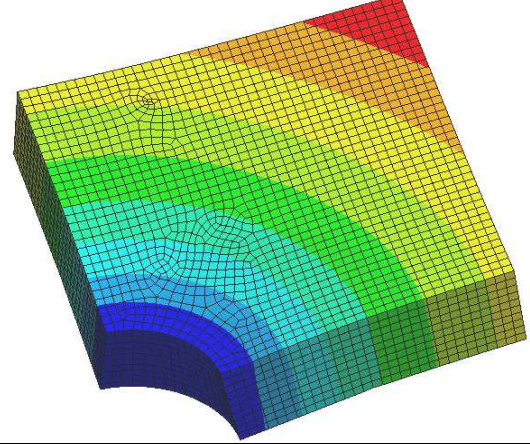
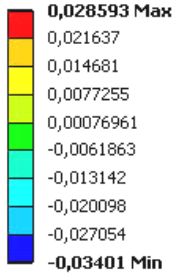
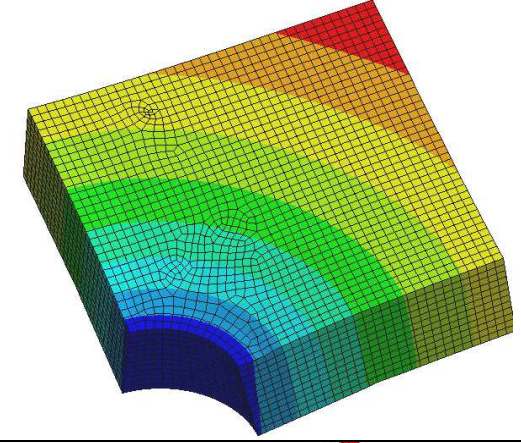
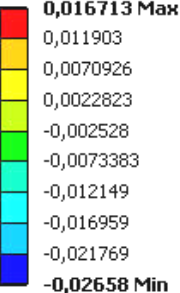
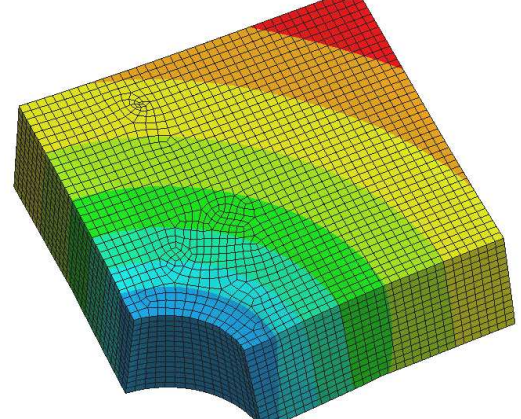
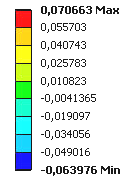
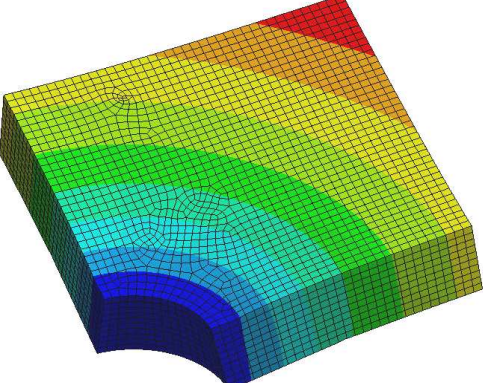
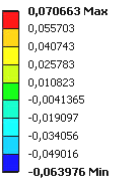
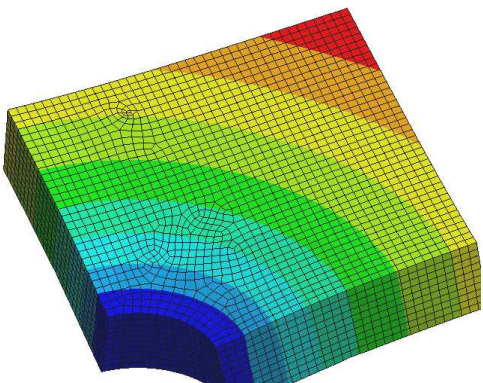
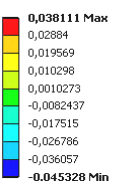
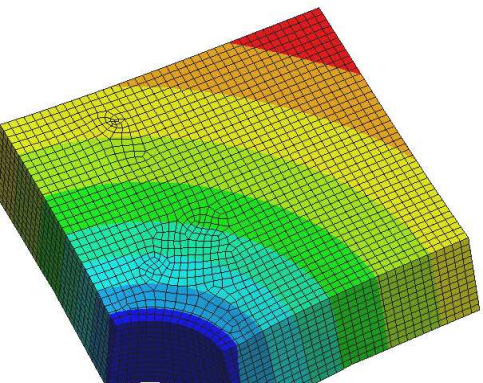
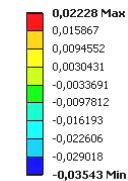
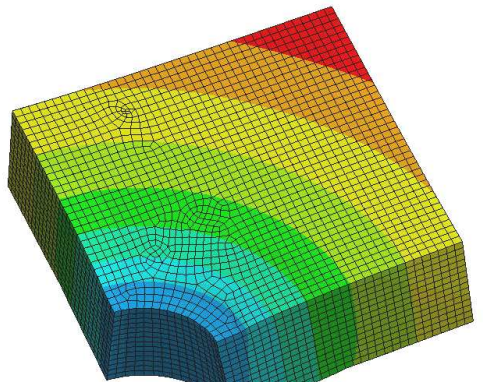
$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (мм)	Шкала	Картина розподілу повних переміщень
75	11	0,188	 <p>0,18887 Max 0,16788 0,1469 0,12591 0,10493 0,083941 0,062955 0,04197 0,020985 0 Min</p>	
	14	0,089	 <p>0,089126 Max 0,079223 0,06932 0,059417 0,049514 0,039612 0,029709 0,019806 0,0099029 0 Min</p>	
	17	0,056	 <p>0,056638 Max 0,050345 0,044052 0,037759 0,031466 0,025172 0,018879 0,012586 0,0062931 0 Min</p>	
	20	0,0442	 <p>0,044276 Max 0,039356 0,034437 0,029517 0,024598 0,019678 0,014759 0,009839 0,0049195 0 Min</p>	

Таблица В.10 – Розподіл осьових переміщень у базовій плиті

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина тах (мм)	Шкала	Картина розподілу осьових переміщень
15	11	0,037; -0,027	 <p>0,03773 Max 0,030451 0,023171 0,015892 0,0086127 0,0013333 -0,005946 -0,013225 -0,020505 -0,027784 Min</p>	
	14	0,0176; -0,016	 <p>0,017647 Max 0,013908 0,010168 0,0064292 0,0026899 -0,0010493 -0,0047886 -0,0085278 -0,012267 -0,016006 Min</p>	
	17	0,0095; -0,011	 <p>0,0095392 Max 0,0072184 0,0048976 0,0025768 0,00025603 -0,0020648 -0,0043856 -0,0067064 -0,0090272 -0,011348 Min</p>	
	20	0,0055; -0,00886	 <p>0,0055744 Max 0,0039699 0,0023654 0,00076091 -0,0008436 -0,0024481 -0,0040526 -0,0056571 -0,0072616 -0,0088661 Min</p>	

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина тах (мм)	Шкала	Картина розподілу осьових переміщень
30	11	0,0754; -0,055	 <p>0,075407 Max 0,06086 0,046312 0,031765 0,017218 0,0026709 -0,011876 -0,026423 -0,040971 -0,055518 Min</p>	
	14	0,035; -0,0319	 <p>0,035265 Max 0,027793 0,020321 0,012849 0,0053771 -0,0020947 -0,0095666 -0,017039 -0,02451 -0,031982 Min</p>	
	17	0,019; -0,022	 <p>0,019068 Max 0,014429 0,0097902 0,0051513 0,00051231 -0,0041267 -0,0087656 -0,013405 -0,018044 -0,022683 Min</p>	
	20	0,0111; -0,017	 <p>0,011147 Max 0,0079389 0,0047307 0,0015224 -0,0016858 -0,004894 -0,0081023 -0,011311 -0,014519 -0,017727 Min</p>	

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина тах (мм)	Шкала	Картина розподілу осевих переміщень
45	11	0,11; -0,083	 <p>0,11307 Max 0,091266 0,069458 0,047651 0,025843 0,004036 -0,017771 -0,039579 -0,061386 -0,083104 Min</p>	
	14	0,052; -0,047	 <p>0,052875 Max 0,041673 0,030471 0,019269 0,0080666 -0,0031354 -0,014338 -0,02554 -0,036742 -0,047944 Min</p>	
	17	0,028; -0,034	 <p>0,028593 Max 0,021637 0,014681 0,0077255 0,00076961 -0,0061863 -0,013142 -0,020098 -0,027054 -0,03401 Min</p>	
	20	0,0167; -0,026	 <p>0,016713 Max 0,011903 0,0070926 0,0022823 -0,002528 -0,0073383 -0,012149 -0,016959 -0,021769 -0,02658 Min</p>	

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина тах (мм)	Шкала	Картина розподілу осьових переміщень
	11	0,0706; -0,063	 <p>0,070663 Max 0,055703 0,040743 0,025783 0,010823 -0,0041365 -0,019097 -0,034056 -0,049016 -0,063976 Min</p>	
	14	0,0706; -0,0639	 <p>0,070663 Max 0,055703 0,040743 0,025783 0,010823 -0,0041365 -0,019097 -0,034056 -0,049016 -0,063976 Min</p>	
60	17	0,038; -0,045	 <p>0,038111 Max 0,02884 0,019569 0,010298 0,0010273 -0,0082437 -0,017515 -0,026786 -0,036057 -0,045328 Min</p>	
	20	0,022; -0,035	 <p>0,02228 Max 0,015867 0,0094552 0,0030431 -0,0033691 -0,0097812 -0,016193 -0,022606 -0,029018 -0,03543 Min</p>	

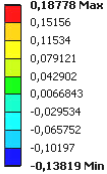
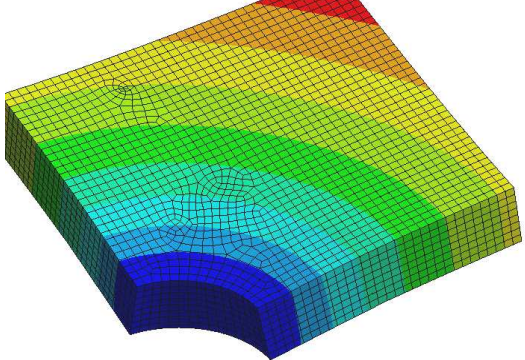
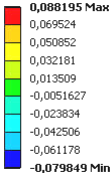
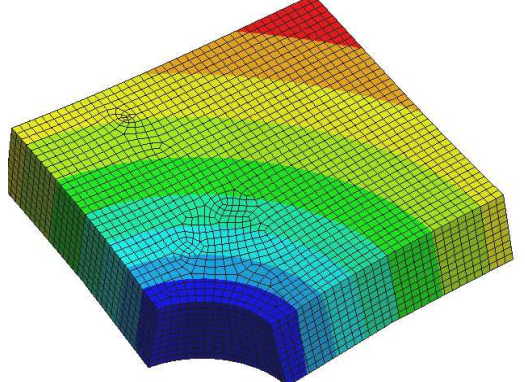
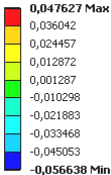
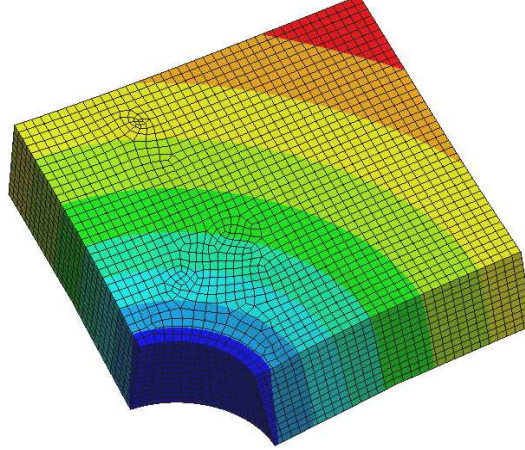
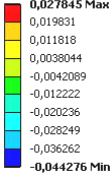
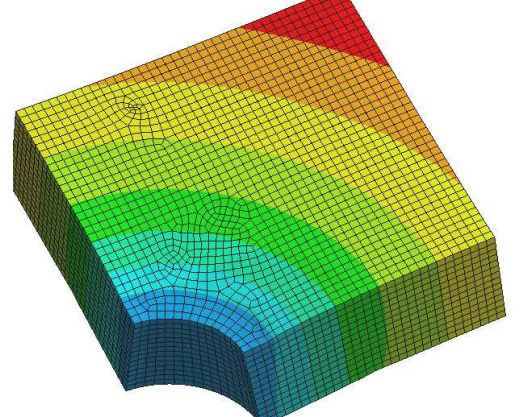
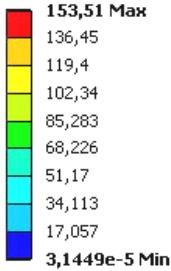
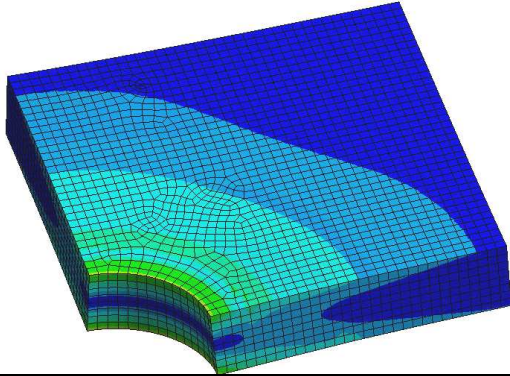
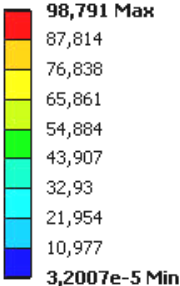
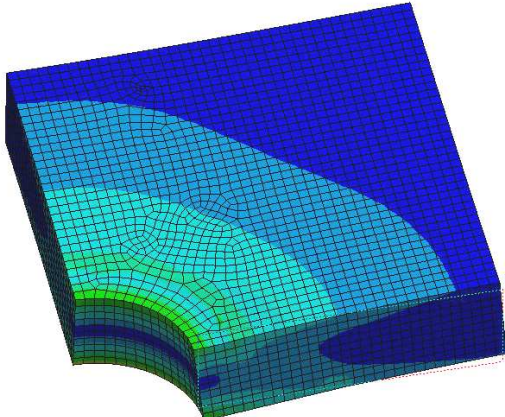
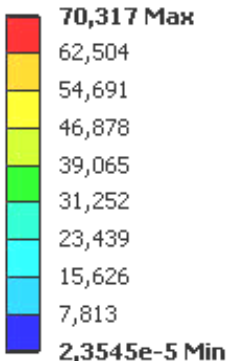
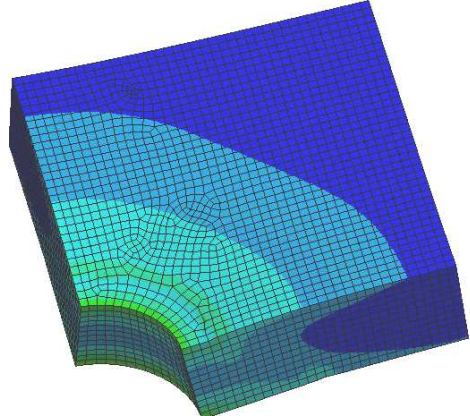
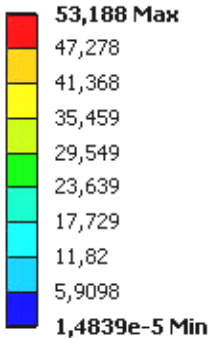
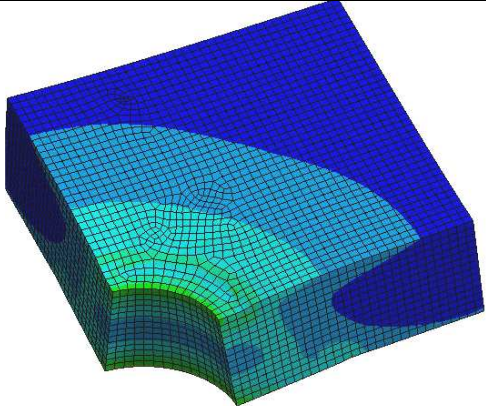
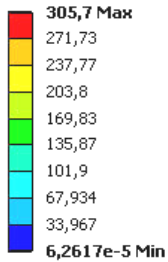
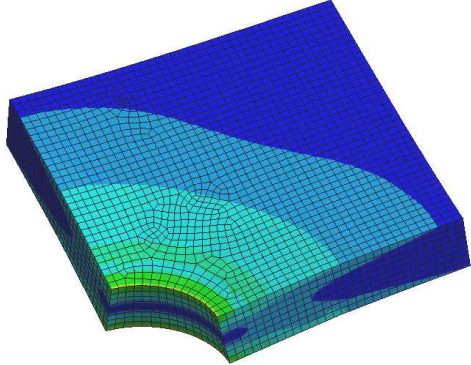
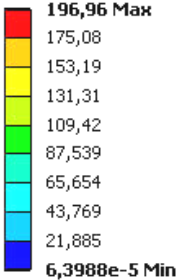
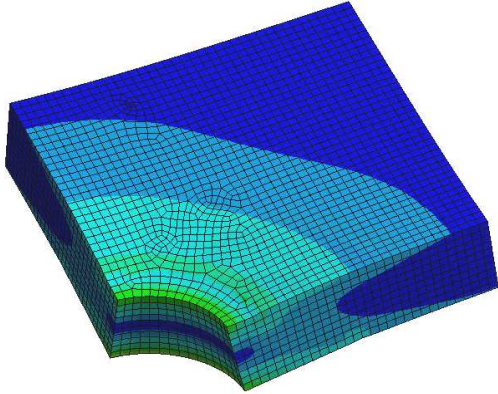
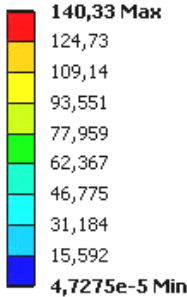
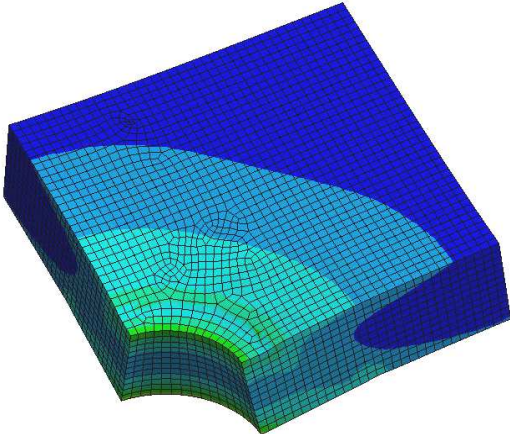
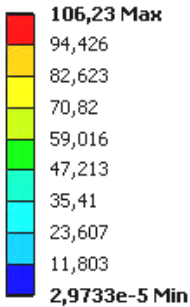
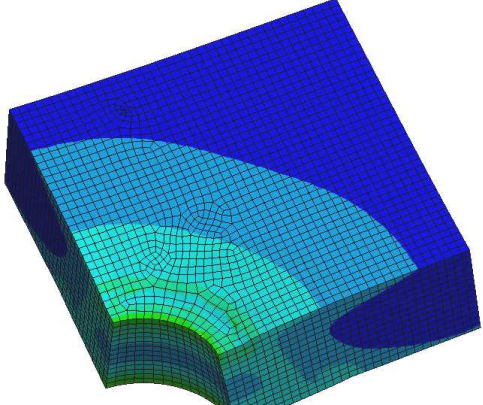
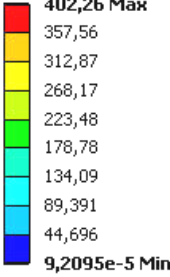
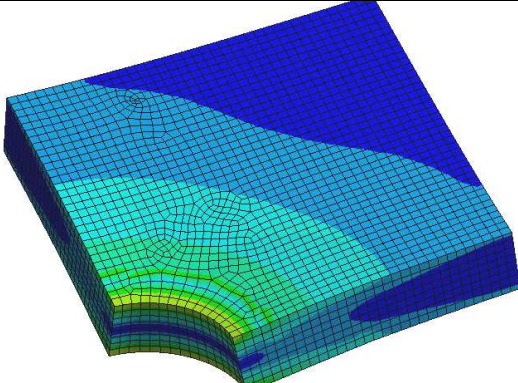
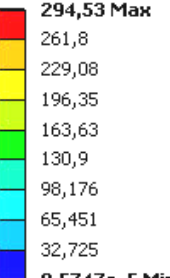
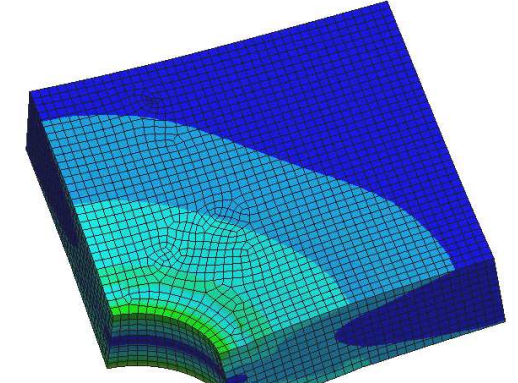
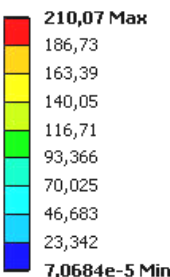
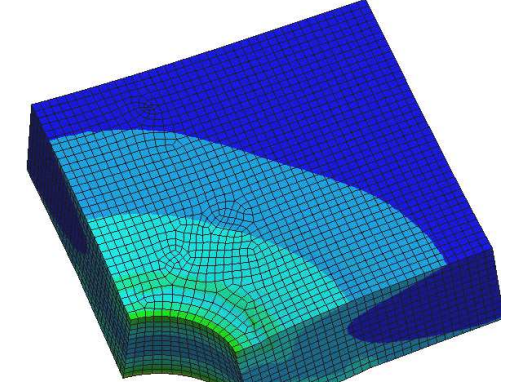
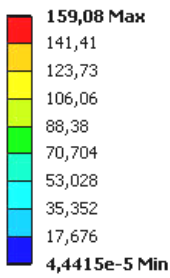
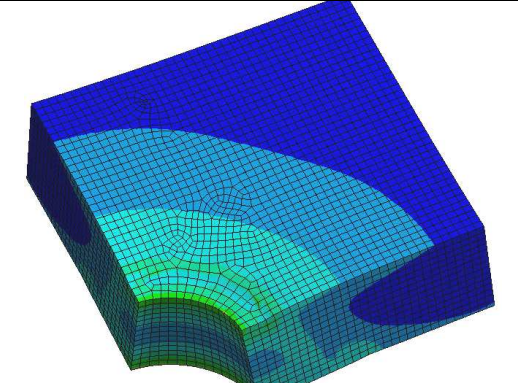
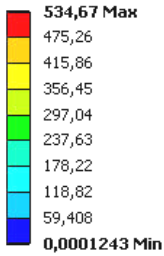
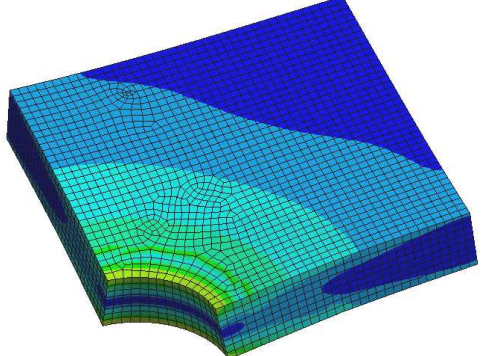
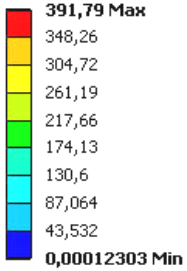
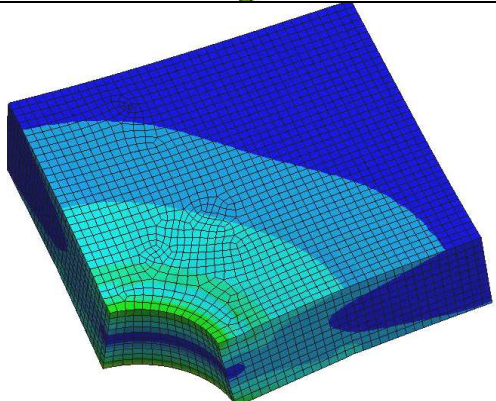
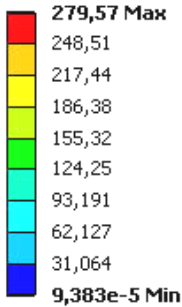
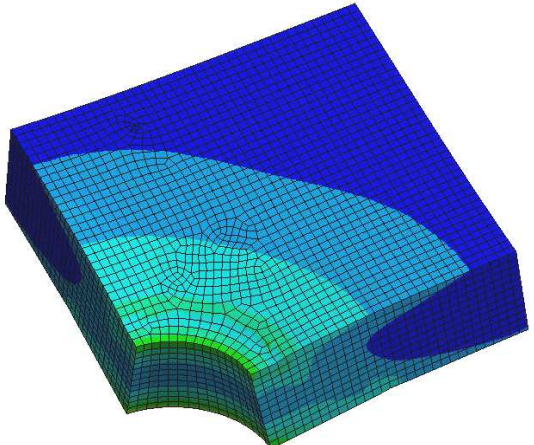
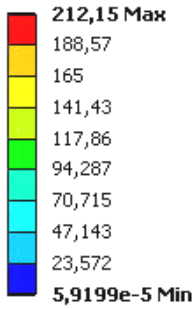
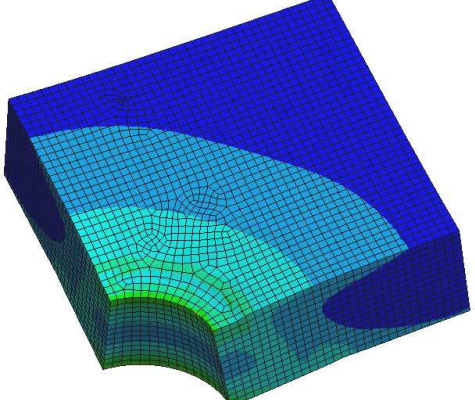
$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина тах (мм)	Шкала	Картина розподілу осьових переміщень
75	11	0,187; - 0,138	 <p>0,18778 Max 0,15156 0,11534 0,079121 0,042902 0,0066843 -0,029534 -0,065752 -0,10197 -0,13819 Min</p>	
	14	0,0798; - 0,088	 <p>0,088195 Max 0,069524 0,050852 0,032181 0,013509 -0,0051627 -0,023834 -0,042506 -0,061178 -0,079849 Min</p>	
	17	0,047; - 0,0566	 <p>0,047627 Max 0,036042 0,024457 0,012872 0,001287 -0,010298 -0,021863 -0,033468 -0,045053 -0,056638 Min</p>	
	20	0,027; - 0,044	 <p>0,027845 Max 0,019831 0,011818 0,0038044 -0,0042089 -0,012222 -0,020236 -0,028249 -0,036262 -0,044276 Min</p>	

Таблица В.11 – Картина розподілу еквівалентних за Мізесом напружень у базовій плиті

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу еквівалентних за Мізесом напружень
15	11	153,5		
	14	98,79		
	17	70,31		
	20	53,188		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу еквівалентних за Мізесом напружень
30	11	305,7		
	14	196,96		
	17	140,33		
	20	106,23		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу еквівалентних за Мізесом напружень
	11	402,26		
45	14	294,53		
	17	210,07		
	20	159,08		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу еквівалентних за Мізесом напружень
60	11	534,67		
	14	391,79		
	17	279,57		
	20	212,15		

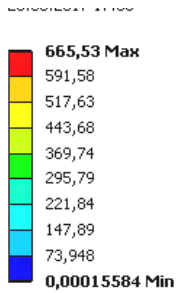
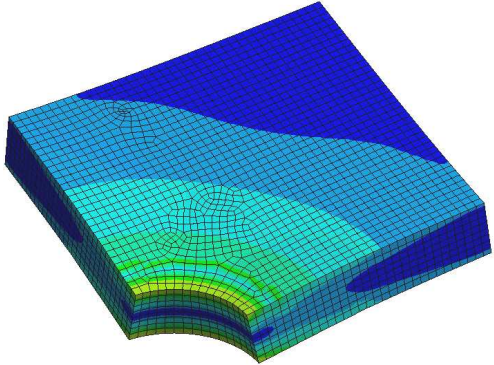
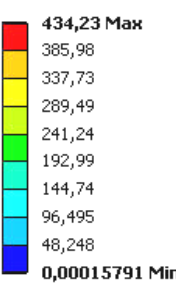
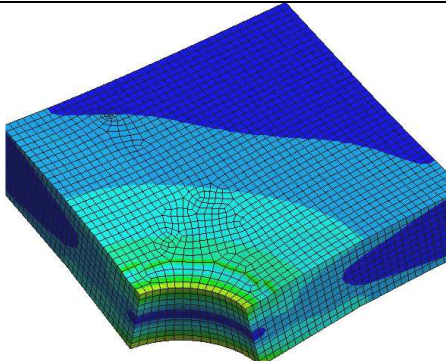
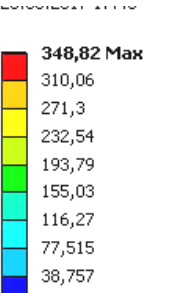
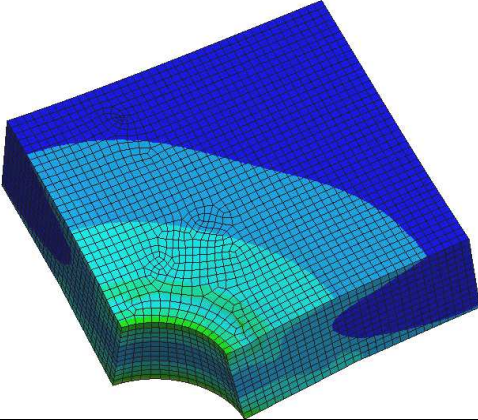
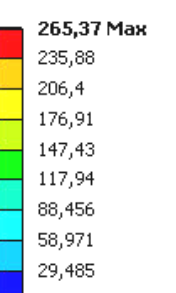
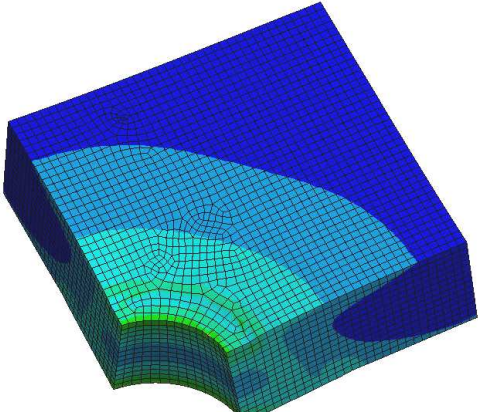
$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу еквівалентних за Мізесом напружень
	11	665,53	 <p>665,53 Max 591,58 517,63 443,68 369,74 295,79 221,84 147,89 73,948 0,00015584 Min</p>	
	14	434,23	 <p>434,23 Max 385,98 337,73 289,49 241,24 192,99 144,74 96,495 48,248 0,00015791 Min</p>	
75	17	348,8	 <p>348,82 Max 310,06 271,3 232,54 193,79 155,03 116,27 77,515 38,757 0,00011731 Min</p>	
	20	265,37	 <p>265,37 Max 235,88 206,4 176,91 147,43 117,94 88,456 58,971 29,485 7,4067e-5 Min</p>	

Таблица В.12 – Картина розподілу осевих нормальних напружень у базовій плиті

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величи-на тах (МПа)	Шкала	Картина розподілу осевих нормальних напружень
15	11	21,21; -153,7	<p>21,216 Max 1,7812 -17,654 -37,089 -56,524 -75,96 -95,395 -114,83 -134,27 -153,7 Min</p>	
	14	14,59; -96,28	<p>14,599 Max 2,279 -10,041 -22,361 -34,681 -47,001 -59,321 -71,641 -83,961 -96,281 Min</p>	
	17	11,33 ; -71,4	<p>11,336 Max 2,1429 -7,0499 -16,243 -25,436 -34,629 -43,821 -53,014 -62,207 -71,4 Min</p>	
	20	9,607 ; -59,84	<p>9,6073 Max 1,8905 -5,8263 -13,543 -21,26 -28,977 -36,693 -44,41 -52,127 -59,844 Min</p>	
30	11	42,48; -307,25	<p>42,484 Max 3,6243 -35,236 -74,095 -112,96 -151,81 -190,67 -229,53 -268,39 -307,25 Min</p>	

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу осевих нормальних напружень
30	14	29,28; -192,49		
	17	22,7 -142,91		
	20	19,29; -119,76		
45	11	63,82; -421,6		
	14	43,95; -288,67		
	17	34,1; -214,34		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина тах (МПа)	Шкала	Картина розподілу осевих нормальних напружень
45	20	28,99; -179,7		
	11	85,06; -562,96		
60	14	58,71; -385,08		
	17	45,602; -286,34		
	20	38,68; -239,81		
75	11	106,39; -705,23		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу осьових нормальних напружень
	14	73,41; -471,68		
	17	57,03 ; -358,25		
	20	48,37 ; -299,9		

Таблиця В.13 – Картина розподілу контактної тиску в зонах контактної взаємодії елементів системи "базова плита – підштампова плита"

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
15	11	57,17		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
15	14	41,03		
	17	30,73		
	20	23,79		
30	11	114,69		
	14	82,06		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
30	17	61,48		
	20	47,62		
45	11	170,58		
	14	123,31		
	17	92,3	<p>20.03.2017 17:22</p>	

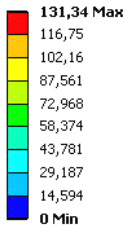
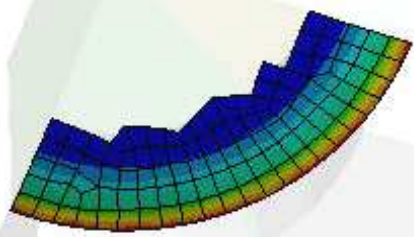
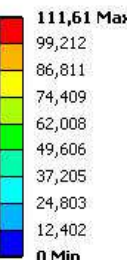
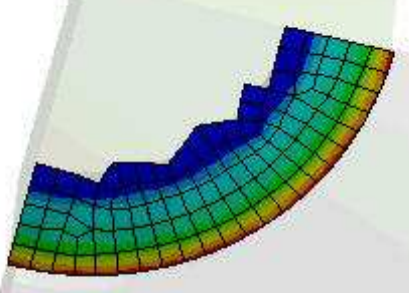
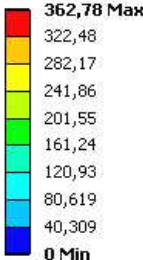
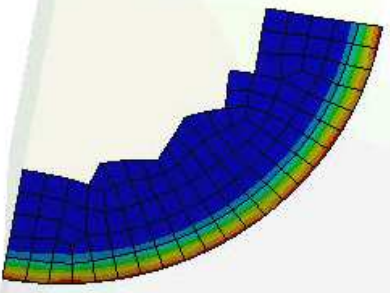
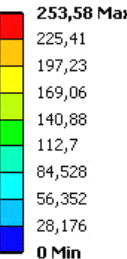
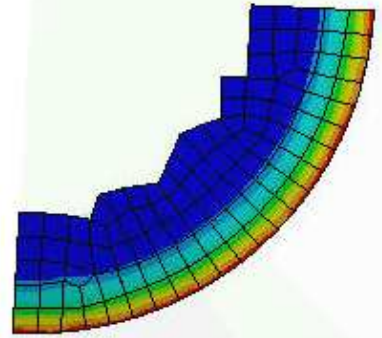
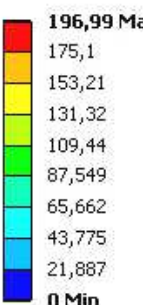
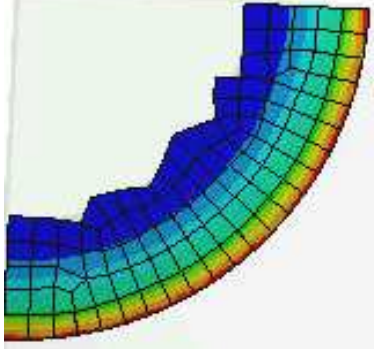
$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
45	20	71,44	<p>71,443 Max</p> <p>63,505</p> <p>55,567</p> <p>47,629</p> <p>39,691</p> <p>31,753</p> <p>23,814</p> <p>15,876</p> <p>7,9382</p> <p>0 Min</p>	
60	11	228,34	<p>228,34 Max</p> <p>202,97</p> <p>177,6</p> <p>152,23</p> <p>126,85</p> <p>101,48</p> <p>76,113</p> <p>50,742</p> <p>25,371</p> <p>0 Min</p>	
	14	164,73	<p>164,73 Max</p> <p>146,43</p> <p>128,12</p> <p>109,82</p> <p>91,517</p> <p>73,213</p> <p>54,91</p> <p>36,607</p> <p>18,303</p> <p>0 Min</p>	
	17	123,18	<p>123,18 Max</p> <p>109,49</p> <p>95,806</p> <p>82,119</p> <p>68,433</p> <p>54,746</p> <p>41,06</p> <p>27,373</p> <p>13,687</p> <p>0 Min</p>	
	20	95,33	<p>95,33 Max</p> <p>84,738</p> <p>74,146</p> <p>63,553</p> <p>52,961</p> <p>42,369</p> <p>31,777</p> <p>21,184</p> <p>10,592</p> <p>0 Min</p>	

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
75	11	286,14		
	14	205,26		
	17	154,08		
	20	119,25		

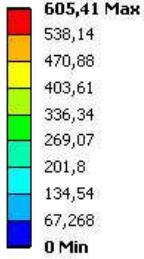
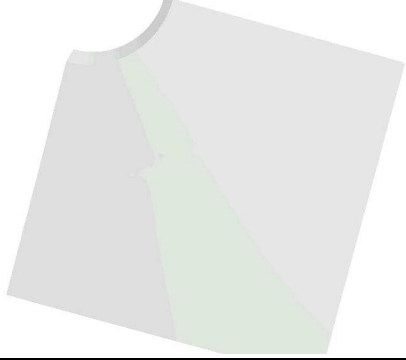
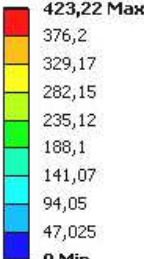
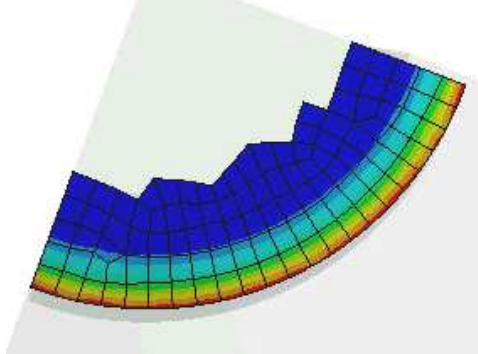
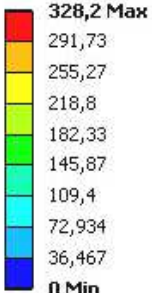
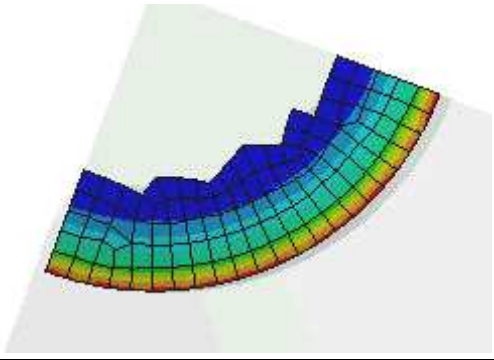
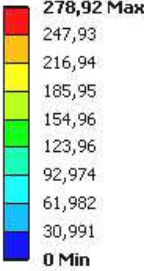
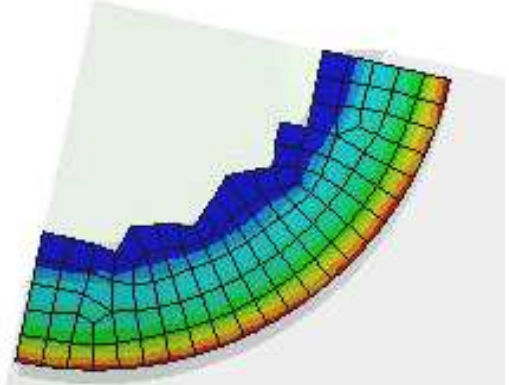
Таблиця В.14 – Картина розподілу контактної взаємодії елементів системи "пакет – базова плита"

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
15	11	120,82		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
15	14	84,47	<p>84,472 Max</p> <p>75,087</p> <p>65,701</p> <p>56,315</p> <p>46,929</p> <p>37,543</p> <p>28,157</p> <p>18,772</p> <p>9,3858</p> <p>0 Min</p>	
	17	65,68	<p>65,686 Max</p> <p>58,388</p> <p>51,089</p> <p>43,791</p> <p>36,492</p> <p>29,194</p> <p>21,895</p> <p>14,597</p> <p>7,2985</p> <p>0 Min</p>	
	20	55,82	<p>55,824 Max</p> <p>49,622</p> <p>43,419</p> <p>37,216</p> <p>31,013</p> <p>24,811</p> <p>18,608</p> <p>12,405</p> <p>6,2027</p> <p>0 Min</p>	
30	11	241,6	<p>241,63 Max</p> <p>214,79</p> <p>187,94</p> <p>161,09</p> <p>134,24</p> <p>107,39</p> <p>80,545</p> <p>53,697</p> <p>26,848</p> <p>0 Min</p>	
	14	168,98	<p>150,2</p> <p>131,43</p> <p>112,65</p> <p>93,877</p> <p>75,102</p> <p>56,326</p> <p>37,551</p> <p>18,775</p> <p>0 Min</p>	

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
30	17	131,34		
	20	111,61		
45	11	362,7		
	14	253,58		
	17	196,99		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина тах (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
45	20	167,39		
60	11	483,91		
	14	338,55		
	17	262,6		
	20	223,17		

$P_{шт}$ (кН)	h (мм)	Величина max (МПа)	Шкала	Картина розподілу контактного тиску
	11	605,41		
75	14	423,22		
	17	328,2		
	20	278,92		

ДОДАТОК Г

УТВЕРЖДАЮ

Директор

КГЦ «АЗОВОБЩЕМАШ»


 " 24 "

2016 г.

Акт

о истреблении результатов диссертационной работы
соискателя кафедры теории и систем автоматизированного
проектирования механизмов и машин
Национального технического университета
"Харьковский политехнический институт"
Ищенко Ольги Анатольевны

Комиссия КГЦ «Азовобшемаш» в составе: зам. директора по металлургическому оборудованию и информационным технологиям Пеклича Михаила Михайловича, гл. сварщика Хоровца Евгения Тарасовича; гл. конструктора, к.т.н. Барчана Евгения Николаевича, в период с 16 по 24 февраля 2016 г., установила, что в ходе выполнения ряда хозяйственных договоров, а также договора о сотрудничестве между НТУ «ХПИ» и ОАО «Азовмаш» за период 2010 – 2015 г.г., были использованы теоретические разработки, полученные соискателем кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" Ищенко Ольгой Анатольевной при работе над диссертацией на соискание научной степени кандидата наук.

Ищенко О. А. предложила новые подходы к описанию динамики механических виброударных систем. Получены важные научные и практические результаты, используемые при проектировании и при изготовлении изделий на предприятиях «Азовмаш». В частности, продемонстрированы возможности применения предложенной технологии численного моделирования при многовариантных исследованиях напряженно-деформированного состояния корпусных элементов многоосевых транспортных средств. Комплексе разработанных моделей передан для использова-

тия при решении прикладных задач обоснования конструктивно-технологических решений и параметров толстолистовых пространственных конструкций.

Научные и практические результаты, полученные Ешченко О. А. в ходе работы над диссертацией, представляют несомненную научную и практическую ценность и могут быть рекомендованы для внедрения на других предприятиях в КБ и НИИ промышленности Украины.

Члены комиссии:

Замдиректора МО и НТ

Главный сварщик

Главный конструктор

 М.М. Неключ
 Е.Т. Хривен
 Е.Н. Барцан

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Національного
технічного університету
"Харківський політехнічний



С.І. Сокол

20 03 2018 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Товариства з обмеженою
відповідальністю "Мелітопольський завод
автотракторних глушників «ЮТАС»"



В.В. Кривницький

03 2018 р.

Акт

про впровадження результатів дисертаційних досліджень

Комісія у складі:

1. Лук'яненко Р.В. – начальник виробництва ТОВ "МЗАПГ «ЮТАС»",
2. Коваленко А.В. – провідний інженер - технолог ТОВ "МЗАПГ «ЮТАС»",
3. Марченко А.П. – проректор НТУ "ХПІ",
4. Зарубіна А.О. – професор кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин" НТУ "ХПІ",

що працювала у період з 06.03.2018р. по 12.03.2018р. у ТОВ "МЗАПГ «ЮТАС»" встановила, що протягом 2010-2018 років у ТОВ "МЗАПГ «ЮТАС»" проводились спільні з Національним технічним університетом "Харківський політехнічний інститут" (НТУ "ХПІ") науково-дослідні та проектно-конструкторські роботи із розробки, дослідження, технологічної підготовки виробництва та виготовлення нових зразків виробів різноманітного призначення.

У ході цих робіт по проектуванню та модернізації виробів використовувалися методи, алгоритми та програмне забезпечення для дослідження напружено-деформованого стану, руйнування та контактної взаємодії елементів складних машинобудівних конструкцій, що розроблені в процесі роботи над

кандидатською дисертацією аспірантки НТУ «ХП» Іщенко О.А. Вказані розробки здійснені в ході робіт, що проводилися на основі договору про співробітництво між ТОВ «МЗАТГ «ЮТАС» та НТУ «ХП», а також при виконанні науково-дослідних (фундаментальних та прикладних держбюджетних тем, зокрема, М1209 "Забезпечення високих технічних характеристик машин військового та цивільного призначення на основі дослідження міцності складнопрофільних деталей" (тематичний план НТУ «ХП», термін виконання 2017-2018рр., № д.р. 0117U004880), П/480-2007 "Розробка теоретичних основ комп'ютерних кластерних технологій та унікального програмно-апаратного комплексу для дослідження складних та надскладних механічних систем" (тематичний план НТУ «ХП», термін виконання 2007-2008рр., №д.р. 0107U006813).

Особисто Іщенко О. А. приймала участь у визначенні напружено-деформованого стану елементів технологічних систем при дії різноманітних факторів. Спеціалізовані параметричні моделі, підходи, алгоритми, розроблені за участі Іщенко О. А., застосовані для визначення раціональних конструктивних параметрів конструкцій елементів технологічних систем та для можливості отримати економічний ефект у розмірі 192,0 тис. грн. (сто дев'яносто дві тисячі гривень).

Впровадження авторських розробок, що орієнтовані на широке застосування сучасних методів математичного моделювання, автоматизованих систем проектування, дослідження та виготовлення, дає змогу підвищити технічні характеристики машин, що проектуються, виробляються та модернізуються на підприємствах вітчизняного машинобудування.

Даний акт не є підставою для виплати винагороди.

Члени комісії:

 Р.В. Лук'яненко
 А.В. Коваленко
 А.П. Марченко
 А.О. Зарубіна

Довідка
про впровадження результатів дисертаційних досліджень здобувача
Іщенко Ольги Анатоліївни

Іщенко О.А. приймала участь у виконанні наступних науково-дослідницьких та науково-технічних робіт за тематичним планом Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»):

1. Прикладна держбюджетна робота М1206 (2013–2014 рр.) «Розробка спеціалізованих програмно-модельних комплексів для комп'ютерного моделювання контактної взаємодії та синтезу форми складнопрофільних тіл» (№ д.р. 0113U000420).
2. Прикладна держбюджетна робота М1207 (2015–2016 рр.) «Розробка методів та моделей механіки контактної взаємодії складнопрофільних тіл методом граничних елементів» (№ д.р. 0115U000521).
3. Прикладна держбюджетна робота М1209 (2017–2018 рр.) «Забезпечення високих технічних характеристик машин військового та цивільного призначення на основі дослідження міцності складнопрофільних деталей» (№ д.р. 0117U004880).
4. Договір про співробітництво із ДП «Завод ім. В.О. Малишева», м. Харків.
5. Договір про співробітництво із ПАТ «Азовмаш», м. Маріуполь.
6. Договір №12673 від 02.06.2018 р. між НТУ «ХПІ» та ДП «Завод ім. В.О. Малишева».
7. Договір за держзамовленням №ДЗ/55 – 2015 «Розроблення технології дискретного зміцнення для збільшення ресурсу елементів конструкцій військової та цивільної мобільної техніки» (2015–2016 рр.). Замовник – МОНУ. (№ ДР 0115U006518).

За цими договорами були виконані роботи із розробки методів та моделей для дослідження контактної взаємодії елементів машинобудівних конструкцій та технологічних систем, у тому числі – розділових штампів для холоднолистового штампування.

Результати досліджень за дисертацією Іщенко О.А. упроваджені за переліченими роботами, що дало можливість досягнути економічного ефекту у дольовому розмірі, що склався 128,0 тис. грн. Розмір ефекту визначено згідно актів упровадження з урахуванням особистого вкладу здобувача Іщенко О.А.

Проректор НТУ «ХПІ»



А.П. Марченко

Науковий керівник, відповідальний
виконавець виконаних робіт

М.А. Ткачук

Відповідальний виконавець договорів

А.В. Грабовський

21.08.2017



ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор
 Національного технічного університету
 «Харківський політехнічний інститут»

Є.І. Сокол
 Сокол Є.І.
 «25» 02 2019 р.

Акт

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
 Іщенко Ольги Анатоліївни**

Комісія у складі:

1. Мигушенко Р.П. – д.т.н., проф., проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»),
 2. Ткачук М.А. – д.т.н., проф., зав. каф. «Теорія і системи автоматизованого проєктування механізмів і машин» (ТММ і САПР),
 3. Устиненко О.В. – к.т.н., доц., проф. каф. ТММ і САПР,
- яка працювала в період з 14.02.2019 р. по 20.02.2019 р. на кафедрі ТММ і САПР НТУ «ХПІ», встановила, що у навчальний процес кафедри ТММ і САПР (навчальні дисципліни «Дослідження зв'язаних фізико-механічних процесів у сучасних САПР», «Математичне моделювання у сучасних САПР» та «Комп'ютерне моделювання динамічних систем») впроваджені математичні моделі та спеціальне програмне забезпечення для дослідження напружено-деформованого стану машинобудівних конструкцій, які запропоновані в дисертаційній роботі здобувача Іщенко Ольги Анатоліївни.

Представлені розробки Іщенко О.А. дають змогу суттєво підвищити рівень викладання за вищевказаними дисциплінами, дають можливість студентам опанувати сучасні чисельні методи, програмне забезпечення та апаратні засоби для дослідження та оцінки напружено-деформованого ста-

ну машинобудівних конструкцій. Зокрема, вони дають можливість застосовувати різні моделі і підходи при виконанні курсових і дипломних робіт студентами спеціальності "Прикладна механіка".

Запропоновані Іщенко О.А. методи і моделі є складовою частиною програмно-апаратного комплексу центру «Тензор» і дають можливість істотно розширити коло науково-дослідницьких задач і навчальних завдань, що вирішуються в науково-дослідницьких і навчальних підрозділах.

Члени комісії



Р.П. Мигущенко



М.А. Ткачук



О.В. Устиненко