

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
Міністерство освіти і науки України

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ОНОПЧЕНКО АНТОН ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 621.98.043 : 539.312 : 621.452.3.002 : 629.7.01(043)

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ШТАМПУВАННЯ-ВИТЯГУВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ З УРАХУВАННЯМ КІНЕМАТИКИ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ НА РЕБРАХ МАТРИЦЬ

05.07.02 – проектування, виробництво та випробування
літальних апаратів
13 – Механічна інженерія

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



А. В. Онопченко

Науковий керівник Курін Максим Олександрович, доцент, кандидат технічних наук

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Онопченко А. В. Удосконалення технології штампування-витягування авіаційних деталей складної форми з урахуванням кінематики течії металу на ребрах матриць. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів. – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, 2025.

У дисертації вирішується актуальне завдання удосконалення технології штампування-витягування завдяки уточненню впливу технологічних факторів на силові параметри процесу деформування та якісні показники штампованих деталей.

Деталі спеціального призначення суттєво покращують якість авіаційної техніки, хоча їхня частка становить 15...20% від загального обсягу всіх листових деталей, питома вага деталей спеціального призначення у конструкції двигуна постійно збільшується. Для виготовлення таких деталей переважно використовується метод штампування.

В даний час спостерігається тенденція все більш інтенсивного вдосконалення методів штампування, інструментів і устаткування для штампування.

Як відомо, на перетяжному ребрі матриці штампу відбувається перехід від фланця до стінової заготовки і змінення напружено-деформованого стану. Це має значний вплив на такі важливі параметри процесу штампування-витягування, як напруження в матеріалі, зусилля витягування, утворення гофрів, стоншення матеріалу стінки, граничний коефіцієнт витягування та довговічність матриці. Проте автори використовують спрощені формули для розрахунку складових деформацій, напружень і зусилля витягування. Як правило, ці рівняння не повністю відповідають фізиці металопластичної течії на перетяжному ребрі і не можуть бути використані для побудови та аналізу таких важливих характеристик, як компоненти деформації, швидкості

деформації, інтенсивності деформацій та швидкості деформацій, а також інтегральних характеристик, наприклад, інтенсивність напруження. Отже, можна зробити висновок що методи визначення деформованого стану заготовки та енергосилових параметрів під час штампування-витягування не повною мірою описують реальний стан процесу.

У першому розділі дисертаційної роботи розглянуто шляхи інтенсифікації та методи підвищення ефективності процесу штампування-витягування авіаційних деталей складної форми. Сформульовано задачу покращення методики розрахунку кінематичних та енергосилових характеристик процесу деформування листових заготовок. Розглянуто формувальні операції листового штампування та їх основні переваги. Розроблено структурну схему напрямків досліджень в галузі листового штампування. Наведено аналіз стану процесів листового штампування. Як показує аналіз наявних досліджень, удосконалення процесу листового штампування залишається актуальним; велика увага приділяється впливу температури, змашувальних матеріалів і конфігурації штампувального устаткування. Розглянуто якість витянутих зразків та вплив глибокого штампування-витягування на мікроструктуру і текстуру зразків. Наведено дослідження морфології захисного покриття на сталевому листі до та після глибокого штампування-витягування.

У другій частині дисертаційної роботи, присвяченій методології дослідження, уточнено структуру комплексних досліджень енергосилових характеристик процесу штампування-витягування. Подано опис устаткування та досліджуваних матеріалів. Процес штампування-витягування проводився в регульованому інструментальному штампі. Розривне навантаження визначали за допомогою каліброваного манометра. Заготовки для експериментальних досліджень виконано для трьох алюмінієвих сплавів АМг (Al-Mg), АМц (Al-Mn) і Д16Т (Al-Cu-Mg), а також титанового сплаву ОТ4 (Ti-Al-Mn).

У третьому розділі дисертаційної роботи вперше отримано залежності, які дають змогу розраховувати та аналізувати напружено-деформований стан

металу на перетяжному ребрі матриці у тривимірному просторі. Досліджено кінематику течії металу при штампуванні-витягуванні металу на перетяжному ребрі. Отримано системи рівнянь, що описують поля швидкостей руху металу, швидкості деформації та деформацій у матеріалі деталі на перетяжному ребрі під час штампування-витягування. Установлено кореляційний зв'язок між деформаційною роботою та параметрами режиму обробки на ребрі матриці.

У четвертому розділі дисертації подано результати цифрового моделювання процесу штампування-витягування в LS-DYNA. При моделюванні розглянуто один тип інструментального штампу в якому витягувались деталі з чотирьох матеріалів з різними діаметрами заготовки. Процес штампування-витягування тривав до руйнування конструкції заготовки. У натурному експерименті проведено дослідження впливу параметрів режимів штампування-витягування на якість отриманих деталей для трьох алюмінієвих та одного титанового сплавів. Прогнозовані результати випробувань показують залежність максимального навантаження та інтенсивності напруження як від діаметра заготовки, так і від межі плинності сплавів, і ці дані узгоджуються з фактичними виміряними значеннями. Порівняння результатів натурального експерименту, моделювання течії металу на перетяжному ребрі та теоретичних розрахунків показує, що запропонована теоретична модель дає задовільні результати та може бути ефективно використана для інженерних розрахунків.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи розроблено рекомендації щодо розширення технологічних можливостей процесу штампування-витягування алюмінієвих і титанових сплавів.

Спроековано технологічний процес виготовлення деталей авіадвигуна: штампування-витягування листової деталі (дефлектор) з плоскої заготовки з урахуванням течії металу на ребрах матриць. Відповідно до розробленого технологічного процесу виготовлення дефлектора виконано розрахунок економічної ефективності. Наведений розрахунок показав, що для розглянутої деталі застосування розробленого технологічного процесу має значні переваги

порівняно з базовим. Разом з тим можливості обмежені габаритами деталей, що виготовляються. Оснащення потребує доопрацювання за зовнішнім навантаженням, параметрами міцності та конструктивними рішеннями.

Наукова новизна одержаних результатів:

- уперше з урахуванням вимоги соленоїдальності отримано систему рівнянь, що описує просторове поле швидкостей переміщень металу на ребрах матриць інструментальних штампів та дає змогу визначати раціональні параметри технологічного процесу штампування-витягування авіаційних деталей складної форми.

- уточнено математичні моделі процесу деформування металу на ребрах матриць при штампуванні-витягуванні, які дають змогу досліджувати картину течії металу у просторі, визначати його напружено-деформований стан та прогнозувати виникнення руйнувань у процесі формоутворення деталей складної форми.

- запропоновано алгоритм технологічної підготовки штампування-витягування деталей складної геометрії в якому вперше врахована просторова картина течії металу на ребрах матриць, що дає додаткову можливість виявляти недоліки пропонованого технологічного процесу та скоротити час на проектування та виготовлення штампового оснащення, а відповідно і терміни підготовки дрібносерійного виробництва деталей складної форми з листа.

Практичне значення одержаних результатів:

- встановлено граничний ступінь витягування та зусиллям для досліджуваних матеріалів, зокрема: для сплавів АМг та Д16Т граничний ступінь витягування в межах 1,6...1,64; для АМц 1,6...1,7, а ОТ4 вище за 2,1;

- розроблено рекомендації, використання яких дає змогу розширити технологічні можливості штампування-витягування таких сплавів як АМг, АМц, Д16Т та ОТ4 завдяки раціональним режимам штампування, які забезпечують відсутність розривів, а також такі показники якості: мінімальні значення товщини в зоні сполучення дно-стінка залежно від марки матеріалу в межах 0,8...0,91 мм – для ступеня витягування 1,57; кривину та овальність в

межах 16,04 % та 2 % відповідно, що лежать в межах допуску 0,080 мм (відповідає 10...12-му квалітету точності розміру відносної геометричної точності А);

– з використанням запропонованого алгоритму технологічної підготовки штампування-витягування деталей складної геометрії удосконалено маршрутну технологію виготовлення дефлектора двигуна Д-136 та виконано розрахунок економічної ефективності, який показав, що новий технологічний процес має значні переваги порівняно з базовим, а саме зменшення тривалості критичного шляху на 27,3 % та річний економічний ефект при обсязі випуску двохсот деталей 70957,9 грн;

– результати роботи підтверджено дослідно-промисловими випробуваннями на АТ «Мотор-Січ» (м. Запоріжжя), ДП «Завод ім. В. О. Малишева (м. Харків)», АТ «Світло Шахтаря» (м. Харків) та прийнято до впровадження. Створено науково-технічну базу, яка використовується для проведення наукових досліджень та підготовки фахівців у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Ключові слова: удосконалення штампування-витягування, авіаційні деталі складної форми, кінематика течії металу, ребра матриць, якість листових деталей складної форми.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковано основні наукові результати дисертаційної роботи.

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

1. Онопченко А. В. Конструкторсько-технологічна підготовка виробництва дефлектора з використанням імпульсних технологій // Авиационно-космическая техника и технология. 2019. № 7 (159). С. 145–150. DOI: 10.32620/aktt.2019.7.21.

Фахове видання

2. Онопченко А. В. Структура дослідження енергосилових параметрів процесів листового штампування // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». Харків, 2021. Вип. 91. С. 49–54. DOI: 10.32620/oikit.2021.91.03. **Фахове видання, «Б»**

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав за напрямом:

3. Investigation the plastic flows in the metal stamping-drawing process at the die corner / A. V. Onopchenko, M. O. Kurin, Y. V. Shyrokyi, O. O. Horbachov // Acta Polytechnica. 2024. Vol. 64, iss. 4. P. 385–397. DOI: 10.14311/AP.2024.64.0385. **Czech Republic, Web of Science, SCOPUS, Q 4.**

Статті у наукових періодичних виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у зарубіжних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

4. Modelling and Simulation of the Plastic Flows in Metal / M. O. Kurin, O. O. Horbachov, A. V. Onopchenko, T. V. Loza // Metallophysics and Advanced Technologies = Металофізика та новітні технології. 2022. Vol. 44, iss. 6. P. 785–806. DOI: 10.15407/mfint.44.06.0785. **Фахове видання, «А», Web of Science, SCOPUS, Q 3.**

5. Onopchenko A. V., Kurin M. O., Shyrokyi Yu. V. Ensuring Quality of Stamping Sheet Aviation Parts // Progress in Physics of Metals = Успіхи фізики металів. 2024. Vol. 25, iss. 2. P. 320–363. DOI: 10.15407/ufm.25.02.320. **Фахове видання, «А», Web of Science, SCOPUS, Q 2.**

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Третьяк В. В., Онопченко А. В. Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства листовых деталей для импульсных технологий // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф., Харків, 22–23 квіт. 2009 р. Харків, 2009. С. 78.

7. Возможности использования компьютерных систем для проектирования

импульсных технологий / В. В. Третьяк, Ю. А. Невешкин, А. В. Онопченко, И. В. Скорченко // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали II Всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф., Суми, 17–20 квіт. 2012 р. Суми, 2012. Ч. 1. С. 34–35.

8. Третьяк В. В. Федорова А. С., Онопченко А. В. Математична модель конструкції і технології виготовлення дефлектора за допомогою імпульсних технологій / В. В. Третьяк, // XXIV Міжнародний конгрес двигунобудівників : тези доп., Миколаїв, Коблево, 2–7 верес. 2019 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» [та ін.]. Харків, 2019. С. 107.

9. Optimal Conditions for Deformation of Stamping-Drawing Process from Aviation Materials / A. Onopchenko, O. Horbachov, V. Sorokin, Y. Dudukalov, M. Kurin // Advanced Manufacturing Processes IV : sel. papers from the 4rd Grabchenko's international conf., Sept. 6–9, 2022, Odessa, Ukraine. Cham : Springer, 2022. P. 109–118. (Lecture Notes in Mechanical Engineering, ISSN 2195-4356). DOI: 10.1007/978-3-031-16651-8_11. **SCOPUS, Q 4**

10. Онопченко А. В. Чисельне моделювання процесу холодного штампування у LS-DYNA // Авіація, промисловість, суспільство : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., Кременчук, 18 трав. 2023 р. / Харків. нац. ун-т внутрішніх справ [та ін.]. Харків, 2023. С. 279–281.

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації:

11. Разработка групповых технологических процессов при изготовлении листовых деталей импульсной обработкой с использованием компьютерных информационных технологий / В. В. Третьяк, О. В. Мананков, Д. А. Овчар, А. В. Онопченко // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. № 60 (3). С. 17–20. **Фахове видання**

12. Определение коэффициента использования металла при штамповке и методы его увеличения / Н. Ф. Савченко, В. В. Третьяк, А. В. Онопченко, С. А. Стадник // Авиационно-космическая техника и технология. 2014. № 117 (10). С. 11–14. **Фахове видання**

ABSTRACT

Onopchenko A.V. Improvement the technology of stamping-drawing process of complex shape aviation parts taking into account the kinematics of metal flow at the dies corners. – Scientific study on the rights of manuscript.

Dissertation with a view to obtaining the academic degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.07.02 – design, manufacture and testing of aircraft. – National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, 2025.

The dissertation solves the urgent problem of improving stamping-drawing through by clarifying the influence of technological factors on the force parameters of the deformation process and the quality indicators of the received parts.

Special parts significantly improve the quality of aircraft engineering, although there are 15...20% of the total volume of all sheet parts, the specific weight of special parts in the engine design is constantly increasing. For the manufacture of such special parts, the stamping method is mainly used.

Currently, there is a tendency to increasingly intensively improve stamping methods, tooling and equipment for stamping.

As we know, on the die corner take place transition from the flange to the wall blank and change in stress-strain state. This one has significant effect on such important parameters of drawing process as stress in material, drawing force, formation of wrinkling, thinning of the wall material, limiting draw ratio and durability of matrix. However, the authors use simplified formulas for calculating the components of deformations, stresses and drawing force. As rule, these equations do not fully correspond to the physics of metal plastic flow on the die corner and cannot be used to construct and analyse such important characteristics as strain components, strain rates, intensity of strains and strain rates, as well as integral characteristics such as stress intensity. Therefore, we are to make a conclusion on methods for determining deformed state of blank and energy-power parameters during stamping-drawing do not fully describe the actual condition of the process.

In the first chapter of the thesis, the ways of intensification and methods of increasing the efficiency of the stamping-drawing process of complex-shaped aviation

equipment parts are considered. The task of improving the methodology for calculating the kinematic and energy-power characteristics of the deformation process of sheet blanks have been formulated. Forming operations of sheet stamping and its main advantages are considered. A classifier of research areas in the field of sheet metal stamping has been developed. An analysis of the state of sheet stamping processes is presented. As an analysis of existing research shows, improving the sheet stamping process still remains relevant; much attention is paid to the influence of temperature, lubricants, and the configuration of stamping equipment on the sheet stamping process. Drawing quality of samples and the influence of deep drawing on the microstructure and texture of samples were considered. Research morphology of protective coating on steel sheet before and after deep drawing reviewed.

In the second part of the thesis, devoted to research methodology, the structure of complex studies of energy characteristics of the stamping-drawing process has been clarified. The description of the equipment and materials under study is provided. The drawing process was carried out in an adjustable tool die for experimental researchers. The breaking load was determined using a calibrated pressure gauge. Billets for experimental studies were carried out for three aluminum alloys AMg (Al-Mg), AMc (Al-Mn) and D16T (Al-Cu-Mg), as well as the titanium alloy OT4 (Ti-Al-Mn).

In the third section of the thesis, for the first time, dependencies have been obtained that allow calculating and analysis of the stress-strain state of metal at the die corner in three-dimensional space. The kinematics of the metal flow has been investigated in the metal stamping-drawing at the die corner. Systems of equations describing the fields of metal movement speeds, strain rate and deformations in the material of the part at the die corner during stamping-drawing were obtained. A correlation between the deformation work and parameters of the processing mode at the die corner has been established.

In the fourth section of the thesis, the results of numerical simulation of the stamping-drawing process have been presented in LS-DYNA. One type of die, with variations in diameters are considered differing in the drawn part size and for each standard size four types of workpiece materials have been considered. The stamping process

lasted until structural failure of workpiece. In full-scale experimental, a research of influence parameters of the stamping-drawing modes on the obtained parts quality for three aluminium and one titanium alloys were carried out. The predicted test results show dependence of the maximum load and stress intensity both on blank diameter and on the yield strength alloys and this data have consistent with the actual measured values. Comparison of the results of a full-scale experiment, simulation of metal flow at the die corner and theoretical calculations shows that proposed theoretical model gives satisfactory results and can be effectively used for engineering calculations.

In the fifth chapter of the thesis, recommendations for expanding technological capabilities of the stamping-drawing process aluminium and titanium alloys have been developed. The technological process of manufacturing aircraft engine part has been designed. As a result, the stamping-drawing of a sheet part (deflector) is considered from a flat billet taking into account the flow of metal at the die corner. According to the designed technological process of manufacturing the deflector, the calculation of economic efficiency was performed. The theoretical calculations shows that for the considered part (deflector), the application of the developed technological process gives satisfactory results compared to the basic one. At the same time, the capabilities are limited by the dimensions of the manufactured parts. Therefore, the equipment requires serious theoretical and experimental research on external load, strength parameters, and constructive solutions.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

- for the first time, taking into account the requirement of solenoidality, a system of equations describing the velocity field of metal movements at the dies corners in three-dimensional space was obtained and allows determining the parameters of the stamping-drawing mode of complex shape aviation parts;
- the mathematical models of the metal deformation at the dies corners of the stamping-drawing process has been improved, which allow for the calculation and analysis of the stress-strain state of the metal, and predict the occurrence of fractures in the forming of complex shape parts;
- an algorithm for the design of a technological process of stamping-

drawing of parts of complex geometry is proposed, in which for the first time takes into account the spatial pattern of metal flow at the dies corners, which makes it possible to identify additional shortcomings of the design technological process and reduce the time for designing and manufacturing die tools, and accordingly, the time for preparing small-scale production.

The practical significance of the work is as follows:

- for materials the relationship between the drawing ratio and the force have been established, in particular: for the AMg (Al-Mg) and D16T (Al-Cu-Mg) alloys the ultimate drawing ratio is within 1.6...1.64; for AMc (Al-Mn) 1.6...1.7, and for OT4 (Ti-Al-Mn) it is above 2.1;
- in order to expand the technological capabilities, due to rational stamping modes, recommendations have been developed for stamping-drawing of such alloys as AMg (Al-Mg), AMc (Al-Mn), D16T (Al-Cu-Mg) and OT4 (Ti-Al-Mn) that ensure the absence of failure and the following quality indicators: minimum thickness values in the bottom-wall depending on the material grade within 0.8...0.91 mm – for a drawing ratio of 1.57; curvature and ovality within 16.04% and 2%, respectively, which corresponds to 10-12 accuracy grade and the level of relative geometric accuracy is A;
- using the proposed algorithm, the technology for manufacturing the D-136 engine deflector was improved and a calculation of economic efficiency has been performed, which showed that the new technological process has significant advantages compared to the basic one, namely a reduction in the duration of the critical path by 27.3 % and the annual economic effect with a production volume of two hundred parts by 70957.9 UAH;
- the results of the dissertation have been accepted for implementation in production at «Motor-Sich» (Zaporizhzhia), V. O. Malysheva (Kharkiv), AT «Svitlo shakhtaria» (Kharkiv). A scientific and technical base has been created, which is used to carry out scientific research and train specialists at the National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”.

Key words: improvement of stamping-drawing, aircraft parts of complex shape, metal flow kinematics, dies corners, quality of complex sheet metal parts.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 ШЛЯХИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ШТАМПУВАННЯ-ВИТЯГУВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ	25
1.1 Конструктивно-технологічні властивості листових деталей складної форми для літаків і двигунів	26
1.2 Методи листового штампування	29
1.3 Аналіз сучасного стану процесів листового штампування	32
1.4 Методи підвищення ефективності штампування листових деталей складної форми.....	45
1.5 Висновки, постановка мети і задач дослідження.....	48
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	50
2.1 Устаткування для процесу штампування-витягування	50
2.1.1 Суть і технологічні особливості штампування-витягування	50
2.1.2 Експериментальна установка для штампування-витягування, її окремі вузли і системи.....	51
2.2 Особливості деформування металу при штампуванні-витягуванні	55
2.3 Вибір матеріалів дослідження	58
2.4 Дослідження енергосилових параметрів процесу штампування-витягування і якості виробів	61
2.5 Показники якості деталей, виготовлених штампуванням-витягуванням	66
2.6 Висновки.....	68
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ ПРИ ФОРМОУТВОРЮЮЧИХ ОПЕРАЦІЯХ ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ	69

3.1	Задачі моделювання процесів пластичної течії металу.....	69
3.1.1	Обтікання гострого клина.....	72
3.1.2	Обтікання пластини при горизонтальній та вертикальній складових.....	74
3.2	Кінематика процесу течії металу на ребрі матриці	78
3.3	Швидкості деформацій	83
3.4	Визначення роботи деформування	90
3.4.1	Коефіцієнт жорсткості.....	90
3.4.2	Види кривих зміцнення.....	92
3.4.3	Робота деформування на перетяжному ребрі	95
3.5	Висновки.....	99
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ШТАМПУВАННЯ-ВИТЯГУВАННЯ НА ЯКІСТЬ ВИГОТОВЛЕНИХ ДЕТАЛЕЙ.....		100
4.1	Цифрове моделювання штампування-витягування в LS-DYNA...	102
4.1.1	Геометричні моделі	103
4.1.2	Матеріали	105
4.1.3	Контакт і симетрія	108
4.1.4	Скінченно-елементна модель.....	109
4.1.5	Налаштування вирішувача LS-DYNA, обмеження та завантаження моделі.....	110
4.1.6	Виконання розрахунків	111
4.2	Матеріали та експериментальні дослідження.....	113
4.2.1	Властивості матеріалу	113
4.2.2	Налаштування експерименту.....	114
4.3	Підтвердження теоретичної моделі експериментальними даними.....	117
4.4	Дослідження якості отриманих виробів.....	120
4.5	Висновки.....	127
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПРОЕКТУВАННЯ		

ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ	128
5.1 Проектування технологічного процесу виготовлення листової деталі авіадвигуна – дефлектора	129
5.1.1 Технологічна підготовка виробництва.....	129
5.1.2 Аналіз конструктивних і технологічних особливостей деталі	130
5.1.3 Обґрунтування вибору матеріалу.....	133
5.1.4 Розроблення маршрутної технології виготовлення дефлектора з урахуванням течії металу на перетяжних ребрах.....	134
5.2 Економічна ефективність	139
5.2.1 Коротка характеристика порівнюваних варіантів	140
5.2.2 Розрахунок та оптимізація календарних термінів виробництва	140
5.3 Висновки.....	154
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	155
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	157
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	174
ДОДАТОК Б СПЕЦИФІКАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ	177
ДОДАТОК В РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ	187

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ГТД	— газотурбінний двигун
ТП	— технологічний процес
КВМ	— коефіцієнт використання матеріалу
$m_{\min}$	— мінімально можливий коефіцієнт витягування
K	— ступінь витягування
q_1, q_2, q_3	— ортогональні криволінійні координати
H_k	— коефіцієнти Ламе
$\varepsilon_{qi} q_k$	— складові швидкості деформації
ε_i	— інтенсивність швидкостей деформацій
e_{ik}	— складові деформації
e_i	— інтенсивність деформації
A	— робота деформації
μ	— коефіцієнт жорсткості
D_σ	— девіатор напружень
D_ε	— девіатор швидкості деформації
E_i	— функція дисипації енергії
σ_{ik}, τ_{ik}	— складові напруження
σ_i	— інтенсивність напружень
σ_s	— межа плинності
σ_b	— межа міцності
δ_H	— параметр кривини
δ_d^j	— параметр овальності
r	— радіус перетяжного ребра
R	— відстань від осі обертання тора до осі твірної
V_p	— радіальна складова швидкості
V_z	— вертикальна складова швидкості
V_ψ	— поперечна складова швидкості

ε_{rr}	— радіальна складова швидкості деформації
ε_{zz}	— вертикальна складова швидкості деформації
$\varepsilon_{\psi\psi}$	— окружна складова швидкості деформації
$a_{\text{фл}}$	— питома робота пластичної деформації на фланці
$a_{\text{ст}}$	— питома робота пластичної деформації на стінці
$a_{\text{дн}}$	— питома робота пластичної деформації на дні
$A_{\text{фл}}$	— робота пластичної деформації на фланці
$A_{\text{ст}}$	— робота пластичної деформації на стінці
$A_{\text{дн}}$	— робота пластичної деформації на дні
$A_{\text{т}}$	— робота пластичної деформації на тороподібній поверхні перетяжного ребра

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Одним з основних напрямків розвитку сучасної технології виробництва деталей авіаційних двигунів є скорочення обсягу технологічних процесів зі зняття металевого шару та його його заміна процесами оброблення тиском з подальшим мінімальним різанням. Використання більш міцних матеріалів і тонших листів дає змогу суттєво підвищити надійність та експлуатаційні характеристики літаків та двигунів. Це виключає застосування зварювальних операцій під час виготовлення великих деталей зі складною криволінійною поверхнею. Також такий підхід дозволяє використовувати мінімальну кількість технологічних поділів деталей та вузлів. Деталі спеціального призначення суттєво покращують якість авіаційної техніки, хоча їхня частка становить 15...20 % від загального обсягу всіх листових деталей, питома вага оригінальних деталей у конструкції двигуна постійно збільшується. Для виготовлення таких оригінальних деталей переважно використовується метод штампування. Листове штампування є поширеним і прогресивним видом технології оброблення металів тиском. Використовуючи листовий матеріал (смугу, стрічку, лист) як вихідну заготовку, листове штампування дозволяє виготовляти велику номенклатуру різноманітних плоских та просторових деталей.

Штампування-витягування досить поширена операція штампування в машинобудуванні, яка призначена для виготовлення порожнистих деталей з плоских і порожнистих заготовок різної форми та розмірів, таких як днища резервуарів, напівсфери, циліндри, мотогондоли авіаційних двигунів, двері, люки, різні кожухи, кришки та інші частини. Процес витягування має ряд переваг, таких як висока продуктивність, висока точність розмірів та форми деталей, що дозволяє отримувати деталі складної геометрії. Ці деталі мають достатню міцність і жорсткість при невеликій питомій вазі у порівнянні зі складальними одиницями (звареними та збірними). Це дозволяє оптимально використовувати вихідний матеріал.

Радіус скруглення матриці штампу має значний вплив на такі важливі параметри процесу витягування, як напруження в матеріалі, зусилля витягування, утворення гофрів, стоншення матеріалу стінки, граничний коефіцієнт витягування та довговічність. Це зумовлює необхідність проведення подальших досліджень пластичної течії металу на перетяжному ребрі матриці та визначення аналітичних залежностей, які дають змогу прогнозувати напружено-деформований стан матеріалу на перетяжному ребрі, а також зусилля витягування на етапі проєктування. У зв'язку з цим виникла необхідність у розробленні методу отримання полів швидкостей процесу листового штампування, що повністю відображає фізику процесу та водночас достатньо простим та прийнятним для інженерних розрахунків. Найбільш придатними методами розрахунку процесів пластичного деформування є методи, що ґрунтуються на замкнутій системі рівнянь механіки суцільного середовища.

Таким чином, дослідження, спрямовані на підвищення ефективності штампування-витягування порожнистих деталей, є актуальними, що й зумовило необхідність подальших теоретичних та експериментальних досліджень спрямованих на забезпечення якості штампування-витягування деталей авіаційної техніки.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення технології штампування-витягування завдяки уточненню впливу технологічних факторів на силові параметри процесу деформування та якісні показники штампованих деталей.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі задачі.

1. З урахуванням конструктивно-технологічних властивостей деталей визначити шляхи інтенсифікації та методи підвищення ефективності процесу штампування-витягування листових авіаційних деталей складної форми.

2. Розробити математичну модель кінематики течії металу на ребрах матриць та визначити функціональний зв'язок між енергосиловими характеристиками деформування та параметрами режиму штампування-витягування.

3. Провести цифрове моделювання процесу штампування-витягування за допомогою симуляції методом скінченних елементів та перевірку цифрових моделей досліджуваних процесів шляхом порівняння отриманих результатів з теоретичними дослідженнями кінематики течії металу та результатами натурального експерименту.

4. Експериментально дослідити вплив параметрів режимів штампування-витягування на якість одержуваних деталей та розробити рекомендації щодо розширення технологічних можливостей процесу штампування-витягування авіаційних деталей складної форми.

5. Провести оцінювання економічної ефективності удосконалення технології штампування-витягування авіаційних деталей складної форми порівняно з існуючими аналогами.

Об'єкт дослідження – процес штампування-витягування авіаційних деталей складної форми.

Предмет дослідження – функціональний взаємозв'язок параметрів режимів штампування-витягування та енергосилових характеристик процесу деформування, а також показників якості одержуваних деталей.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на загальних рівняннях механіки суцільних середовищ, фундаментальних основах теорії пластичної течії металів, механіки деформування і руйнування металів.

Експериментальні дослідження виконувались у лабораторних умовах з використанням сучасних методів дослідження і вимірювальної апаратури. Штампування-витягування виконувалось на чотирьох типах інструментальних штампів, на модернізованому пресі моделі П-125 з фіксацією поточного зусилля за допомогою каліброваного манометра. Чисельне моделювання процесу холодного штампування-витягування проводилося за допомогою ліцензійного пакета скінченних елементів LS-DYNA версії R11.2.2.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Уперше з урахуванням вимоги соленоїдальності отримано систему рівнянь, що описує просторове поле швидкостей переміщень металу на ребрах

матриць інструментальних штампів та дає змогу визначати раціональні параметри технологічного процесу штампування-витягування авіаційних деталей складної форми.

2. Уточнено математичні моделі процесу деформування металу на ребрах матриць при штампуванні-витягуванні, які дають змогу досліджувати картину течії металу у просторі, визначати його напружено-деформований стан та прогнозувати виникнення руйнувань у процесі формоутворення деталей складної форми.

3. Запропоновано алгоритм технологічної підготовки штампування-витягування деталей складної геометрії в якому вперше врахована просторова картина течії металу на ребрах матриць, що дає додаткову можливість виявляти недоліки пропонованого технологічного процесу та скоротити час на проектування та виготовлення штампового оснащення, а відповідно і терміни підготовки дрібносерійного виробництва деталей складної форми з листа.

Особистий внесок здобувача. У дисертації викладено результати досліджень щодо вирішення актуальної задачі підвищення ефективності штампування-витягування та якості деталей авіаційної техніки, отримане автором з колегами кафедри технології виробництва авіаційних двигунів у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». Автор особисто виконав експериментальні дослідження та обробив результати експериментів, сформулював мету досліджень і запропонував теоретичні й експериментальні методи дослідження.

У наукових працях автору належать:

- у роботі [1] – здобувач виконав особисто;
- у роботі [2] – здобувач виконав особисто;
- у роботі [3] – отримано залежності, які дають змогу виконувати розрахунок та аналіз напружено-деформованого стану металу у просторі;
- у роботі [4] – моделювання та аналіз отриманих систем рівнянь;
- у роботі [5] – розроблено структурну схему досліджень у галузі листового штампування;

- робота [6] – опис алгоритмів проєктування технологічних процесів листового штампування;
- робота [7] – аналіз можливостей проєктування технологічних процесів листового штампування за допомогою існуючих CAD/CAM/CAE-систем;
- робота [8] – проєктування технологічного процесу виготовлення дефлектора за допомогою імпульсних технологій;
- робота [9] – отримано систему рівнянь, що описують поле швидкостей переміщень металу на ребрі матриці інструментального штампа у просторі;
- робота [10] – здобувач виконав особисто;
- у роботі [11] – аналіз та проєктування групового технологічного процесу виготовлення листових деталей;
- у роботі [12] – аналіз технологічних можливостей технологічного устаткування для листового штампування-витягування.

Усі положення дисертації, які винесено на захист, отримано здобувачем самостійно. Постановка задач і аналіз результатів досліджень проводилися разом з науковим керівником. Проведення виробничих випробувань виконано спільно зі співробітниками кафедри технології виробництва авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». Результати спільних робіт наведено в дисертації з відома співавторів.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення роботи викладено й обговорено на науково-практичних конференціях різних рівнів:

- Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки», 2009 р., Харків, Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац. ін-т», Україна;
- XIV Міжнародний конгрес двигунобудівників, 2009 р., Рибаче, Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац. ін-т», Україна;
- II Всеукраїнська міжвузівська конференція «Сучасні технології в промисловому виробництві», 2012 р., Суми, Сумський державний університет, Україна;

– XXIV Міжнародний конгрес двигунобудівників, 2019 р., Коблево, Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац. ін-т», Україна;

– 4th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2022), 2022 р., Odessa, Ukraine;

– Міжнародна науково-практична конференція «Авіація, промисловість, суспільство», 2023 р., Кременчук, Кременчуц. льотний коледж, Україна.

У повному обсязі дисертація доповідалась на розширеному засіданні науково-технічного семінару кафедри технології виробництва авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Повний обсяг дисертації становить 195 сторінок, у тому числі основний текст на 110 сторінках, 62 рисунка, 20 таблиць, 135 найменувань літературних джерел на 17 сторінках, 3 додатки на 22 сторінках.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження у вибраному напрямку виконувалися на кафедрі технологій виробництва авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» при реалізації держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України, де автор був безпосереднім виконавцем: «Теоретичні основи створення захисних нанокompозитних покриттів на високонавантажених елементах конструкцій авіаційних двигунів» (№ ДР 0112U001320); «Теоретичні основи створення єдиної комплексної системи керування якістю відповідальних деталей аерокосмічної техніки технологічними методами» (№ ДР 0115U001220); «Комплексні технології управління якістю відповідальних деталей аерокосмічної техніки» (№ ДР 0117U002503); «Підвищення продуктивності та екологічної безпеки процесів механічної обробки різанням, пластичного деформування і нанесення покриттів на важкооброблювані матеріали деталей ГТД» (№ ДР 0120U102116).

Практичне значення отриманих результатів.

1. Установлено граничний ступінь витягування та зусиллям для досліджуваних матеріалів, зокрема: для сплавів АМг та Д16Т граничний ступінь витягування в межах 1,6...1,64; для АМц 1,6...1,7, а ОТ4 вище за 2,1.

2. Розроблено рекомендації, використання яких дає змогу розширити технологічні можливості штампування-витягування таких сплавів як АМг, АМц, Д16Т та ОТ4 завдяки раціональним режимам штампування, які забезпечують відсутність розривів, а також такі показники якості: мінімальні значення товщини в зоні сполучення дно-стінка залежно від марки матеріалу в межах 0,8...0,91 мм – для ступеня витягування 1,57; кривину та овальність в межах 16,04 % та 2 % відповідно, що лежить в межах допуску 0,080 мм (відповідає 10...12-му квалітетам точності розміру відносної геометричної точності А).

3. З використанням запропонованого алгоритму технологічної підготовки штампування-витягування деталей складної геометрії удосконалено маршрутну технологію виготовлення дефлектора двигуна Д-136 та виконано розрахунок економічної ефективності, який показав, що новий технологічний процес має значні переваги порівняно з базовим, а саме зменшення тривалості критичного шляху на 27,3 % та річній економічній ефект при обсязі випуску двохсот деталей 70957,9 грн.

4. Результати роботи підтверджено дослідно-промисловими випробуваннями на АТ «Мотор-Січ» (м. Запоріжжя), ДП «Завод ім. В. О. Малишева (м. Харків), АТ «Світло Шахтаря» (м. Харків) та прийнято до впровадження. Створено науково-технічну базу, яка використовується для проведення наукових досліджень та підготовки фахівців у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Робота виконана на кафедрі «Технології виробництва авіаційних двигунів» Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» (м. Харків). Автор висловлює щире подяку співробітникам кафедри «Технології виробництва авіаційних двигунів» за цінні поради та допомогу при проведенні, обговоренні та оформленні результатів даної роботи.

РОЗДІЛ 1 ШЛЯХИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ШТАМПУВАННЯ-ВИТЯГУВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

Використання більш міцних матеріалів і більш тонких листів може значно підвищити експлуатаційну надійність і експлуатаційні характеристики літаків і двигунів в авіаційній техніці [1, 2]. Це виключає використання зварювальних операцій для виробництва великих деталей зі складними криволінійними поверхнями. Також такий підхід дає змогу використовувати мінімальну кількість технологічних поділів деталей і вузлів [3, 4].

Деталі спеціального призначення значно підвищують якість авіаційної техніки. Хоча їх частка становить 15...20 % від загального обсягу всіх листових деталей, питома вага деталей спеціального у конструкції двигуна постійно зростає. Для виготовлення таких деталей в основному використовується метод штампування [5].

Листове штампування – поширений і дуже прогресивний вид технології оброблення металів тиском [6]. Використовуючи листовий матеріал (смугу, стрічку, лист) як вихідну заготовку, листовим штампуванням можна виготовляти великий асортимент різноманітних плоских і просторових деталей. Удосконалення технології, конструкцій матриць і використовуваного устаткування призвело до того, що листове штампування використовується для виготовлення деталей найрізноманітніших розмірів (від часток міліметра до декількох метрів) і конфігурацій (від простих плоских деталей до складних просторових, таких як облицювальні частини літаків, двигунів, автомобілів або деталей пристроїв).

Проте процес розвитку листового штампування ще далекий від завершення [7, 8]. У теперішній час спостерігається тенденція все більш інтенсивного вдосконалення методів штампування, інструментів і устаткування для штампування. Наприклад, звичайні способи штампування суттєво змінюються шляхом введення диференційованого нагрівання заготовок. Крім того,

створюються машини, які відкривають нові технологічні можливості, наприклад, для пресових робіт зі стоншенням заготовки тощо.

Таким чином, дослідження, спрямовані на удосконалення технології штампування-витягування авіаційних деталей складної форми, які забезпечують мінімальну трудомісткість і собівартість виготовлення заданих деталей, є актуальними та заслуговують на увагу [9, 10].

1.1 Конструктивно-технологічні властивості листових деталей складної форми для літаків і двигунів.

Великогабаритні тонкостінні деталі виготовляють різними способами, наприклад, вирізанням елементів, згинанням і зварюванням. Застосування різних способів штампування [11, 12] забезпечило: підвищення якості виготовлених деталей, зниження трудомісткості продукції, зменшення кількості ручних і довідних робіт, скорочення часових і матеріальних витрат на підготовку виробництва і, власне, на саме виробництво. Підвищення якості виготовлених деталей призвело до нових конструктивно-технологічних властивостей одержуваних деталей: точність і складність формованих поверхонь, розміри виробів, відносна товщина і міцнісні властивості використовуваного металу.

Проте деталі літаків і двигунів використовують для виконання складних функцій: забезпечення несної здатності вузлів і виробу в цілому; розмежування середовищ – робочих і навколишніх, що мають різні параметри тиску, температури, щільності, швидкості; забезпечення мінімальних втрат при обтіканні потоками різних середовищ тощо.

Силові функції у більшості випадків виконують деталі кожухової форми або плоскі з елементами жорсткості. Розмежувальні функції середовища виконують деталі з куполоподібними або каналними поверхнями. Ці деталі можна представити у вигляді комбінації трьох основних компонентів: дна, стінки та фланця (рисунок 1.1). [13] Такі компоненти можуть використовуватися для перенесення додаткових елементів для поглинання навантажень (рифти,

пукльовки тощо), а також локальних елементів для розміщення та монтажу в них датчиків, пристроїв і вузлових блоків.

На основі комбінації елементів деталей ми можемо створити таблицю з рекомендованими назвами деталей у таких координатах, як відносна висота-тип елемента (таблиця 1.1). [13, 14].

На їх основі можна розробити комплексну деталь, яка включає всі елементи. Ескіз такої деталі наведено на рисунку 1.1.

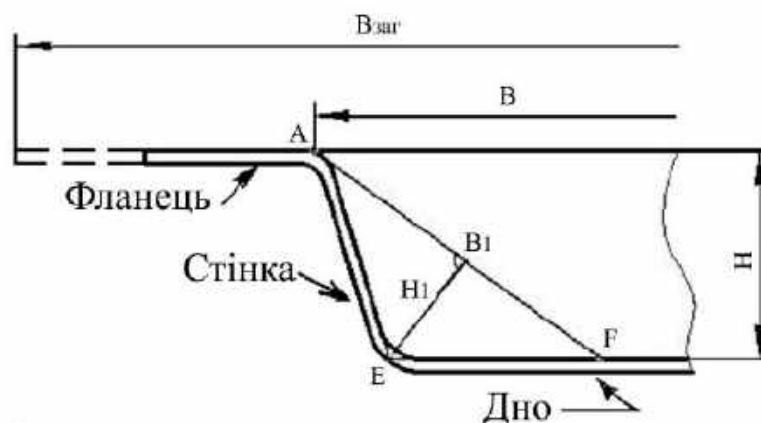


Рисунок 1.1 – Узагальнена схема деталі [13]

Листові деталі, які використовуються в авіаційних газотурбінних двигунах, можна згрупувати за конструктивними, технологічними, конструктивно-технологічними характеристиками, точністю, механічними та фізико-механічними властивостями матеріалів.

Форми з незліченної кількості конструктивних особливостей найбільш повно класифікуються за конструктивно-технологічними характеристиками. Це дозволяє встановити можливість виготовлення деталей методами штампування. Конструктивні форми стабільні і не підлягають зміні у залежності від типу і технічних можливостей виробництва.

Спільність конструктивних ознак класифікації дозволяє систематизувати різноманіття форм не тільки деталей, які зараз використовуються в конструкціях авіадвигунів. У майбутньому це також може бути використано для деталей, які не мають широкого застосування через відсутність технологічних рішень для їх виробництва.

Таблиця 1.1 – Масив деталей у координатах – відносна висота – тип елемента [13, 14]

№ п/п	Елемент	Плоскі	Дрібні	Середні	Глибокі	Подовжені
1	Дно	жорсткості	обтічники		днища	напівпатрубки
2	Фланець	фланці	тори	окантовки		
3	Дно + фланець		мембрани			
4	Стінка + дно + фланець		тарілки	чаши	куполи	гільзи
5	Стінка + дно		денця	днища	стакани	обшивки
6	Стінка + фланець		окантовки		лотки	
7	Стінка	кільця		обичайки		патрубки

Що стосується класифікації за спільністю технологічних ознак, то вона носить суто умовний характер і потребує ретельного техніко-економічного порівняння. Також вона заснована на спільності застосовуваного технологічного процесу. Класифікація листових деталей авіаційних двигунів за конструктивно-технологічною спільністю ознак дає змогу визначити основні технологічні завдання, що дозволяє комплексно охопити максимально повне використання технологічних можливостей усіх процесів штампування.

Проблеми класифікації листових деталей авіаційних двигунів, виготовлених штампуванням, розглядалися в роботах [11, 15]. Існують рекомендації (рисунк 1.2), згідно з якими всі технологічні процеси формоутворення залежно від форми заготовки, складності та розмірів деталей поділяють на три класи:

- 1 клас – деталі, виготовлені з циліндричних заготовок;
- 2 клас – деталі з конічних заготовок;
- 3 клас – деталі з плоских заготовок.

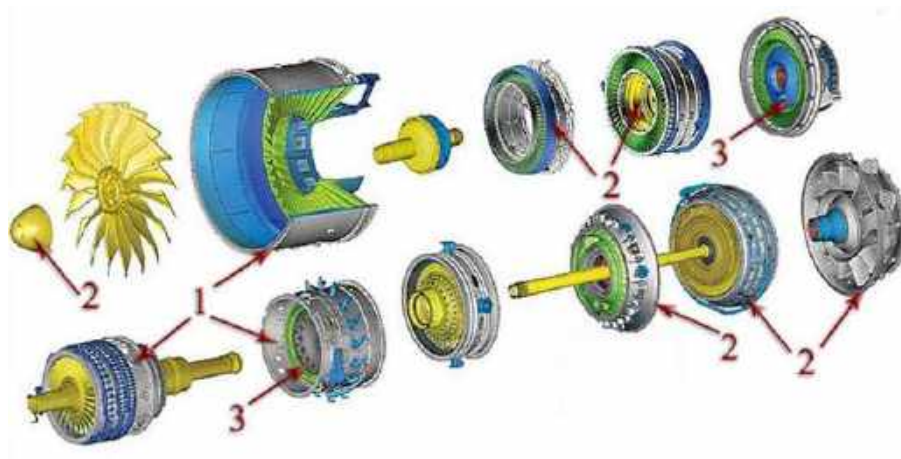


Рисунок 1.2 – Класифікація деталей двигуна і форм заготовок для штампування [15]: 1 – циліндрична; 2 – конічна; 3 – плоска

Типові деталі двигуна наведені на рисунку 1.3 [11]. Деталі виготовляються методами листового штампування.



Рисунок 1.3 – Типові деталі двигуна виготовлені методом листового штампування [11]

1.2 Методи листового штампування

Одним з основних способів оброблення металів у сучасному машинобудуванні є листове штампування. Деталі, отримані штампуванням, мають форму і розміри, які відповідають формі і розмірам робочих частин

штампів. Листове штампування широко використовується у всіх галузях промисловості: загальному машинобудуванні, приладобудуванні, авіаційній та автомобільній промисловості. Так, сучасний автомобіль містить близько 70...80% штампованих деталей, літак – до 75...80%, а в ряді широкопрофільних виробництв кількість штампованих деталей досягає (за кількістю) 95...98%.

Основні переваги листового штампування:

- можливість виготовлення міцних, легких і жорстких тонкостінних деталей простих і складних форм, які неможливо або важко отримати іншими способами;

- висока точність розмірів і якість поверхні, що дає змогу звести до мінімуму механічне оброблення;

- порівняльна простота механізації та автоматизації процесів штампування, що забезпечує високу продуктивність (30 000...40 000 деталей за зміну з одного верстата);

- адаптованість до масштабів виробництва, при якому листове штампування може бути економічно вигідним як у масовому, так і в дрібносерійному виробництві.

Деякі з відзначених переваг листового штампування пов'язані з тим, що формоутворення заготовки здійснюється шляхом її пластичного деформування і при цьому деформується значна частина заготовки. Зазвичай холодне формування листового металу супроводжується зміцненням металу і характеризується деформацією заготовки без попереднього нагрівання. Як правило, якість поверхні не погіршується і навіть може покращитися порівняно з якістю поверхні оригінальної заготовки.

Змінення механічних, а іноді і фізико-хімічних властивостей металу при пластичній деформації відкриває додаткові можливості (крім технологічних і конструктивних можливостей листового штампування). Це можливості створення максимально легких конструкцій із заданою міцністю та жорсткістю.

Основною метою проектування технологічного процесу виготовлення деталей листовим штампуванням є вибір найбільш раціональних операцій і

послідовності їх використання. Це дає змогу отримати деталі із заданими експлуатаційними властивостями при мінімальних витратах і хороших умовах роботи. Всі операції виконуються за допомогою спеціальних інструментів – штампів, які мають різні конструкції в залежності від призначення. Штampi складаються з робочих елементів, таких як матриця, пуансон, і допоміжних деталей – затискачів, напрямних, упорів тощо. Пуансон втискається у метал, що деформується, або охоплюється деталлю. Матриця охоплює заготовку, що змінює форму, і пуансон.

У листовому штампуванні застосовують такі основні види формоутворення заготовок: згинання, штампування-витягування, волочіння дроту, ротаційне витягування, обтягування, місцеве формування, відбортовка, обтиснення, розвальцьовування [12]. Основні формувальні операції листового штампування показані на рисунку 1.4.

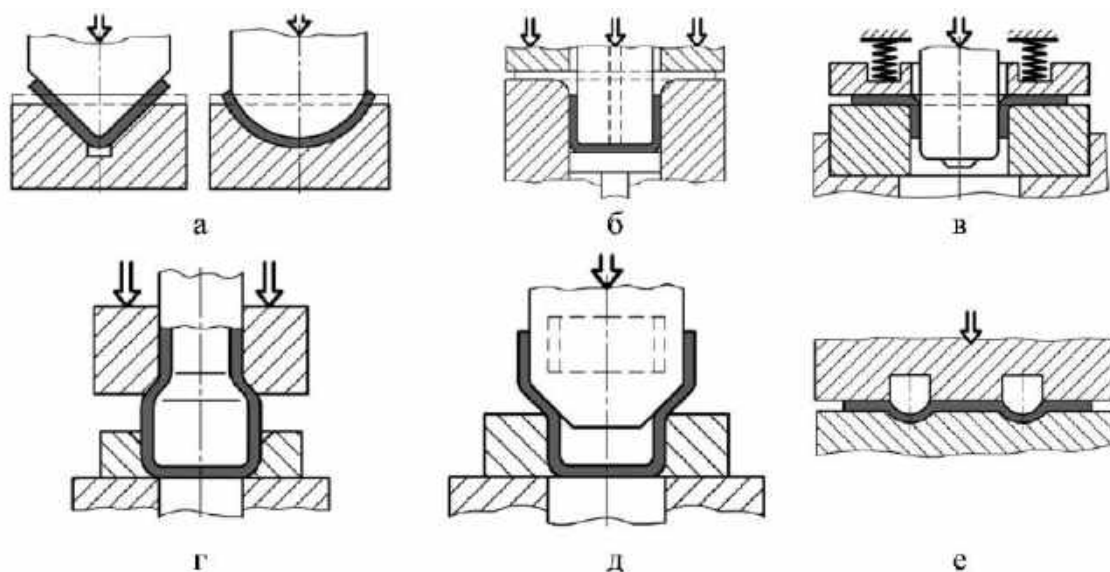


Рисунок 1.4 – Формоутворювальні операції листового штампування [12]:

а – згинання; б – штампування-витягування; в – відбортовка;

г – обтиснення; д – розвальцьовування; е – рельєфне штампування

Листовим штампуванням, шляхом змінення форми заготовки, виготовляють найрізноманітніші деталі, необхідні в техніці та побуті: літаки, двигуни, ракети, автомобілі, трактори, вагони та деталі різних цистерн і котлів, деталі морських суден, деталі велосипедів і мотоциклів тощо. Перерахувати

навіть основні деталі, виготовлені листовим штампуванням, дуже складно, настільки різноманітний їх асортимент. Це також зумовлює різноманітність типозмінних операцій листового штампування.

1.3 Аналіз сучасного стану процесів листового штампування

На початку XX ст. листове штампування зіграло виняткову роль в автомобілебудуванні (особливо у виготовленні) кузовів; у 30-ті рр. – в авіабудуванні, суднобудуванні та виробництві побутових машин; в 50-ті роки – у ракетобудуванні.

Значний внесок у розвиток теорії та технології листового штампування зробили Р. В. Піхтовніков, Ю. М. Алексєєв, В. К. Борисевич, В. Г. Степанов, та багато інших вітчизняних вчених та інженерів, а також зарубіжні вчені Г. Закс, Е. Зібель, Х. Свіфт, Е. Томсен, Ш. Кобаяші, В. Джонсон та ін. Більшість розробок технологічних процесів та устаткування для листового штампування також виконувалося спільно фахівцями ХАІ та галузевих інститутів авіаційної промисловості та загального машинобудування. Так Алексєєвим Ю. М. було запропоновано методи розрахунку процесів пластичного деформування, які базуються на рівняннях замкнутої системи механіки суцільного середовища, для ефективного прогнозування енергосилових характеристик різних видів оброблення тиском, які демонструють зв'язок функціональних характеристик процесу з технологічними параметрами режимів оброблення. [16]

Теорія листового штампування продовжує розвиватися і вдосконалюватися і сьогодні. Так авторами роботи [17] запропоновано модифікований процес гарячого штампування багатошарових листів, це дослідження було доповнено в роботі [18] проведенням експерименту з ідентифікації міжфазного теплообміну листа титанового сплаву в процесі гарячого штампування тришарового листа. Результати аналізу показали, що коефіцієнт теплопередачі межі розділу зростає зі збільшенням контактного тиску і зменшується зі збільшенням товщини сталевго листа та контактного зазору.

Дослідження впливу температури та швидкості нагрівання на механічні та поверхневі властивості гарячештампованих деталей дозволило авторам [19] дослідити процес гарячого штампування надміцних сталевих листів при значних тисках і відносно низьких температурах з використанням швидкого резистивного нагрівання. Вдалось встановити, що при високій швидкості нагрівання $100\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ при температурі нагрівання $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ твердість штампованих деталей підвищується порівняно з твердістю листів у стані поставки.

У роботі [20] наведені результати випробувань процесу гарячого штампування-загартування алюмінієвого сплаву для дослідження впливу температури та швидкості деформації на його поведінку у процесі деформування. Автори також досліджували відповідні механічні властивості та відповідні мікроструктури. Пластичність більше 30% може бути отримана при відносно низькій температурі, деформації та швидкості деформації. Механізм руйнування змінюється від в'язкого транскристалітного до в'язкого міжзеренного руйнування внаслідок ослаблення міцності границь зерен при високих температурах. Слід зазначити, що в цьому випадку не спостерігаються високі показники міцності отриманих виробів. Вирішенням цього питання займалися автори [21], вивчаючи системи охолодження штампового оснащення для процесів гарячого штампування високоміцних алюмінієвих сплавів, які потребують дуже високих швидкостей загартування для забезпечення стану перенасиченого твердого розчину у формованих деталях. Було запропоновано метод, який дозволяє ефективно виробництво конформних систем охолодження шляхом вбудовування мережі трубчастих охолоджувальних каналів до відливої матриці.

Подальші дослідження систем охолодження оснащення [22, 23] дозволили розширити технологічні можливості гарячого листового штампування. Результати мікроструктури підтвердили доцільність використання інструментів гарячого штампування у багатопроцесних циклах.

Авторами роботи [24] запропоновано ввести високошвидкісне обертання пуансона у звичайний процес відбортівки отворів, щоб використовувати тепло

від тертя для покращення параметрів штампування. Схема штампування з обертанням пуансона наведена на рисунку 1.5. Заготовки затискалися одним й тим саме затискачем і матрицею, внутрішній діаметр яких 42 мм (у двох варіантах процесу відбортки, як показано на рисунку 1.5, а).

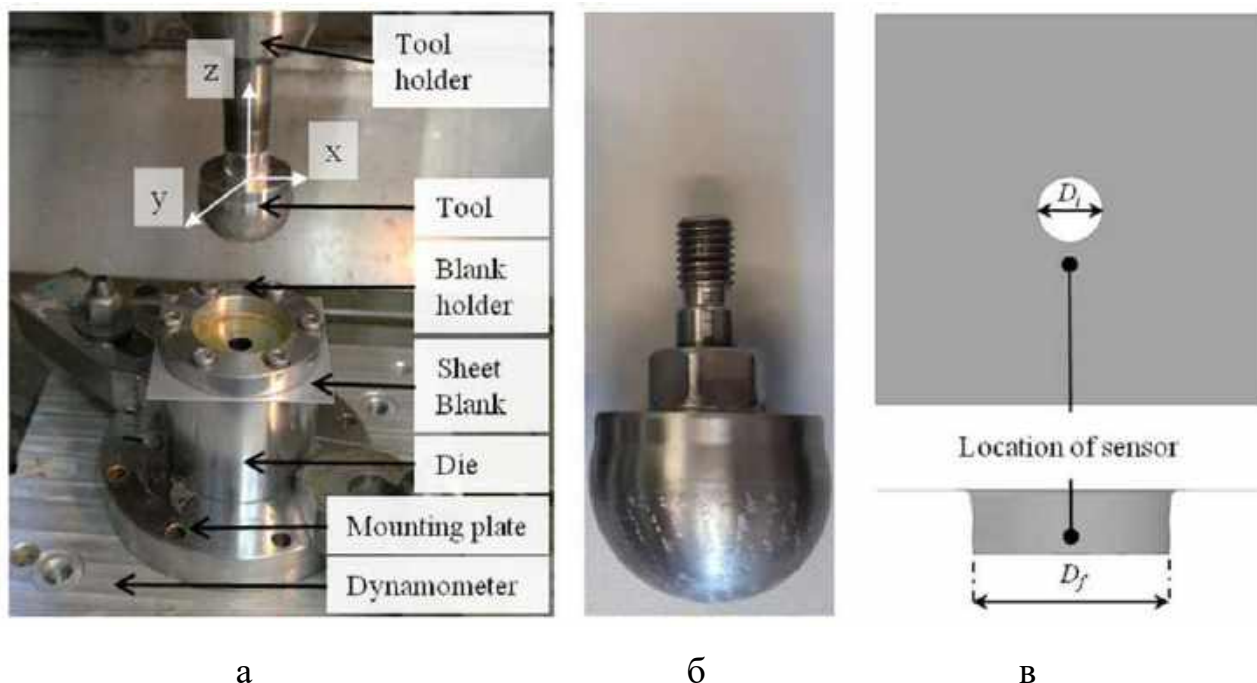


Рисунок 1.5 – Експериментальний пристрій для відбортки отворів з обертанням пуансона (а), пуансон, використаний в експериментах (б), розташування термопар на заготовці до та після відбортки отвору (в) [24]

Штампування з обертанням пуансона проводили на заготовках з діаметром отворів 12 мм і 10 мм, що відповідає коефіцієнтам розширення отворів 3,3 і 4 відповідно. Для відбортки використовували пуансон діаметром 40 мм (рисунок 1.5, б). Температури заготовок вимірювали поблизу отвору за допомогою термопар, наклеєних на зовнішню поверхню заготовки під час процесів відбортки (рисунок 1.5, в).

Штампованість алюмінієвих сплавів при підвищених температурах має життєво важливе значення для проектування процесів та чисельного моделювання гарячого штампування алюмінію. У роботі [25] автори експериментально та чисельно досліджували можливість гарячого штампування сплаву АА7075. Скінченно-елементна модель з використанням програмного

забезпечення ABAQUS із реалізованою моделлю механіки руйнування суцільного середовища через підпрограму була створена та підтверджена відповідними експериментами. Виявлено, що здатність до штампування можна покращити при зниженні температури штампування та збільшенні швидкості процесу.

У роботі [26] досліджено залишкові напруження, які виникають у процесі штампування. Встановлено, що залишкові напруження, спричинені поетапним процесом формування листа, є переважно розтягувальними на внутрішній поверхні та стисними на зовнішній поверхні листа в усіх сформованих геометріях. Експериментальними дослідженнями кривих течії листового матеріалу дослідниками роботи [27] було встановлено, що алюмінієві сплави мають тенденцію до насичення кривих течії, що суттєво знижує наклеп листового матеріалу.

У роботах [28, 29] досліджено залишкові напруження на поверхні та всередині стакану глибокого витягування з листової сталі надвисокої міцності класу 1180 МПа. Експериментальна установка для глибокого витягування наведена в роботі [29] (рисунок 1.6).

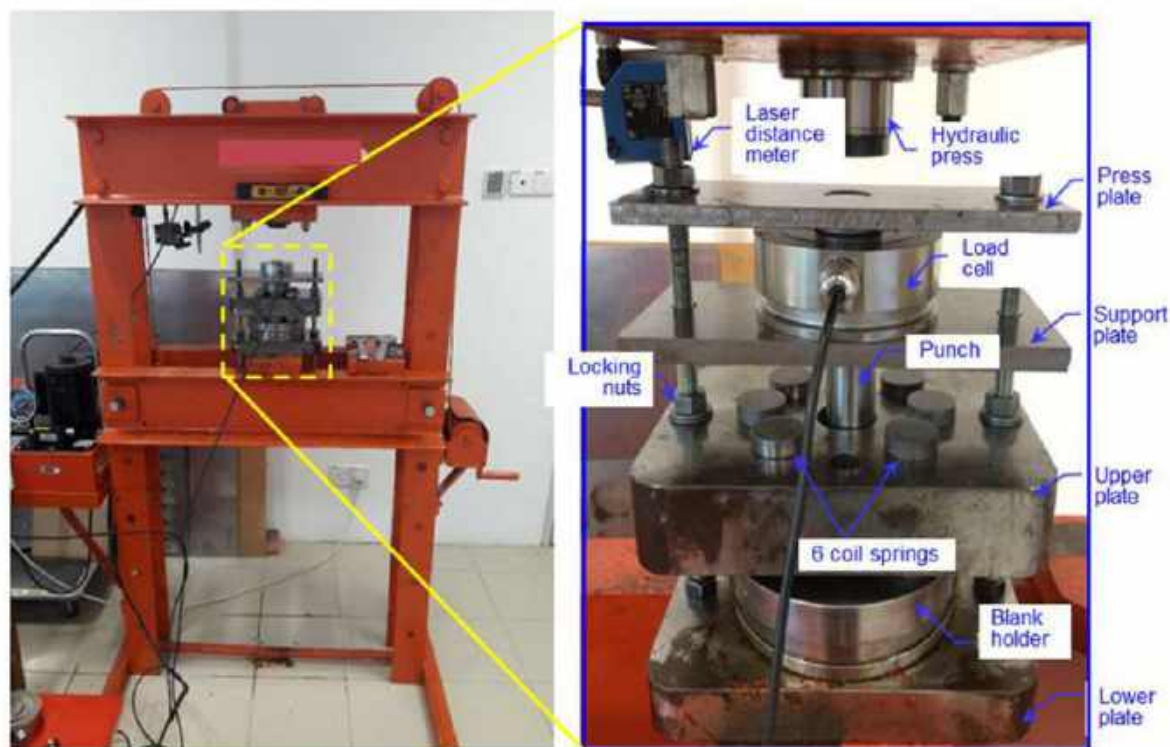


Рисунок 1.6 – Експериментальний пристрій [29]

No.	BHF (kN)	Delayed crack	Drawn cup	Enlarged view	No.	BHF (kN)	Delayed crack	Drawn cup	Enlarged view
1	6	No (Wrinkle)			7	12	No		
2	7	Yes			8	13	Yes		
3	8	Yes			9	14	Yes		
4	9	Yes			10	15	Yes		
5	10	Yes			11	16	No (Tearing at bottom)		
6	11	Yes							

Рисунок 1.8 – Витягнуті стакани, сформовані при підвищеному зусиллі притиску заготовки [29]

Спостерігалось стоншення на крайці заготовки малого діаметра, яке локально може досягати 10,0%. Пружинення на різних ділянках заготовки сильно відрізнялося. Масивне позитивне пружинення виникло на крайці малого діаметра та крайці великого діаметру, а невелика кількість негативного пружинення сталося у верхньому лівому куті заготовки через недостатнє розширення матеріалу. Автори також відзначили, що гофроутворення і пружинення можна зменшити шляхом збільшення зусилля притиску заготовки, тоді як зростатиме стоншення. Тому авторами запропоновано технологічні рекомендації щодо процесу холодного штампування з метою мінімізації прояву гофроутворення і пружинення.

Використання все більш тонких листів призвело до дослідження механізмів формоутворення при спеціальному пластичному руйнуванні [31]. В

якості критерію руйнування використовувалася крива границі міцності, визначена експериментально. Результати вказують на оптимальну швидкість штампування, яка забезпечує максимальну швидкість без початку руйнування.

Для розширення діапазону ефективних деформацій було запропоновано багатоступінчастий процес прокатки, який дає можливість попереднього деформування алюмінієвого листа вище подвійної дійсної деформації [32]. Цифрове моделювання з використанням програмного забезпечення Abaqus для процесу холодної прокатки алюмінієвих смуг підтвердило, що більша частина смуги деформується в умовах стиснення плоскої деформації. Результати моделювання для багатоетапного витягування циліндричного стакану виявили можливе гофроутворення у зоні входу до матриці під час етапу перетяжки процесу, якщо використовується крива течії прокатка-розтягнення.

Робота [33] була присвячена граничним деформаціям листів з алюмінієвого сплаву 5754-O з урахуванням ефекту закону зміцнення. Оцінка впливу закону зміцнення на прогнозовану криву границі деформування показала, що закон зміцнення вплинув на змінення поверхні текучості через швидкість зміцнення. Пізніше було запропоновано покращений закон зміцнення, щоб відобразити взаємозв'язок пластичного напруження та деформації, і як теоретичний прогноз, так і цифрове моделювання підтвердили достовірність покращеної моделі.

З метою вивчення точності формоутворення процесу багатоточкового штампування листового металу в нормальних умовах повного обмеження авторами [34] було проведено поглиблений аналіз точності форми заготовок при багатоточковому штампуванні з індивідуально керованим зусиллям-переміщенням. У роботі [35] розроблено новий підхід до визначення зусиль згинання, розгинання та тертя, які беруть участь у процесах глибокого витягування металевих листів, на основі тесту на витягування-згинання листа. Заслугує на увагу нова розроблена техніка формування – гарячого штампування-загартування [36]. Результати показали, що подовження до руйнування позитивно корелювало з температурою, змінюючись від 15 % у стані загартування до 26,1 % при 440 °C. Подальші дослідження запропонували метод

зворотного витягування для виготовлення листових деталей з алюмінієвого сплаву [37]. Як моделювання, так і експериментальні результати показали, що зусилля притиску заготовки та шлях навантаження тиском суттєво впливають на формоутворення кінцевої деталі. Отримані тут результати підтвердили можливе застосування гідромеханічного зворотного витягування для виробництва листових деталей без дефектів шляхом оптимізації параметрів процесу.

З огляду на збільшення реактивного зусилля на штампі при збільшенні зусилля оброблення, автори [38] досліджували процес штампування удосконаленої високоміцної сталеві балки та стан несної здатності штампу для штампування. Кінцевий результат показав, що легкий пуансон і якісна штампована деталь без втомної деформації можуть бути ефективно досягнуті шляхом оптимізації топології. Авторами роботи [39] було розроблено тип імітаційної моделі процесу гарячого штампування жароміцного титанового сплаву TA32 для дослідження руйнування складної обшивки літака за допомогою діаграми граничних напружень при формуванні як інструменту для оцінки здатності до штампування. Теоретична крива граничного листового штампування зі сплаву TA32 була отримана методом випробування Наказіма, який є випробуванням на вигинання напівсферичним жорстким штампом [40]. Принципова схема тесту Наказіма показана на рисунку 1.9.

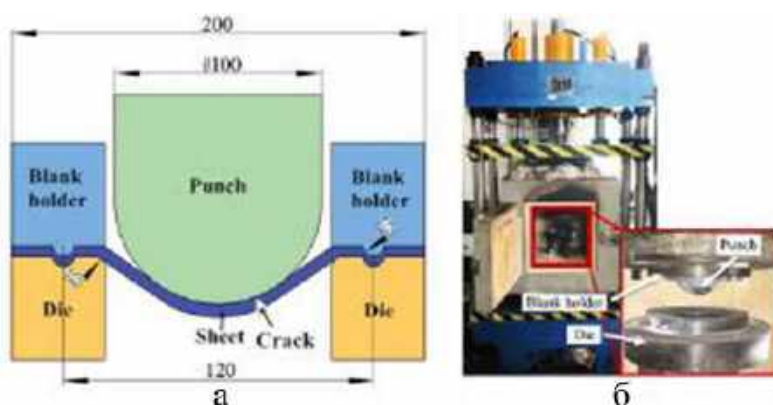


Рисунок 1.9 – Принципова схема тесту Наказіма [40]

Результати показують, що матеріали розвивають стійкість до руйнування у відповідь на підвищення температури та зниження швидкості штампування. Прогнозовані результати також показують, що форма заготовки є важливим фактором, який впливає на формоутворення деталей.

У дослідженні [41] запропоновано ефективний чисельний підхід для моделювання штампування автомобільного листа з урахуванням деформації інструментів. Аналіз показує, що деформація інструменту, зокрема деформація тримача заготовки, є критичною для якісних параметрів формоутворення деталей з листового металу, і запропонований метод може бути ефективною чисельною схемою як альтернатива традиційному моделюванню штампування листа з жорстким інструментом.

Враховуючи очевидну потребу у більш довговічному матеріалі штампа, в роботі [42] автори оцінили характеристики спрацювання та втоми нового матеріалу штампа, який був розроблений для штампування надміцної сталі. Незважаючи на те, що надміцна сталь є сприятливим матеріалом через її високу міцність і хорошу штампувальність, цей матеріал створює нові проблеми для структури штампувального оснащення через можливі пошкодження штампів під час виробництва. Метод оптимізації структурної топології штампа для штампування наведено в дослідженні [43] на основі скінченно-елементного моделювання процесу штампування листового металу. Результати показують, що вага оптимального пуансона зменшується, а його продуктивність покращується. Що ще важливіше, реконструйований пуансон можна виготовити.

Інший варіант використання спеціального устаткування наведено в рукописі [44], де подано експериментальне та чисельне дослідження процесу розвальцьовування алюмінієвого листового металу AA1050-H14 у вільному розширенні при використанні гнучкого пуансона. Порівняння між гнучким і жорстким пуансонами було виконано за допомогою коду скінченних елементів ABAQUS/Explicit. Розроблене моделювання ефективно передбачає реалістичний розподіл товщини вздовж опуклої частини.

В роботі [45] був розроблений процес калібрування форми з використанням гнучкого штампа, спрямований на зменшення надмірної накопичувальної деформації в ребрах з малим радіусом при багатопрхідному штампуванні. Результати показали, що точність штампування та рівномірність товщини оболонки були покращені шляхом вибору гнучкої матриці з

відповідною твердістю, товщиною та геометрією. Процеси сухого листового штампування пов'язані з серйозними проблемами, особливо коли мова йде про алюміній у якості матеріалу заготовки. У [46] зазначено, що наноскопічно гладкі покриття на основі аморфних вуглеводнів можуть значно зменшити спрацювання (рисунок 1.10).

Високі вимоги до екологічного та сталого виробництва означають, що змащення для штампування необхідно постійно переглядати та переробляти. У дослідженні [47] було оцінено трибологічні характеристики чотирьох базових масел з різною хімічною структурою (парафіною та нафтовою) та в'язкістю, а також води для штампування сталевих листів та порівняно з процесом без змащення.

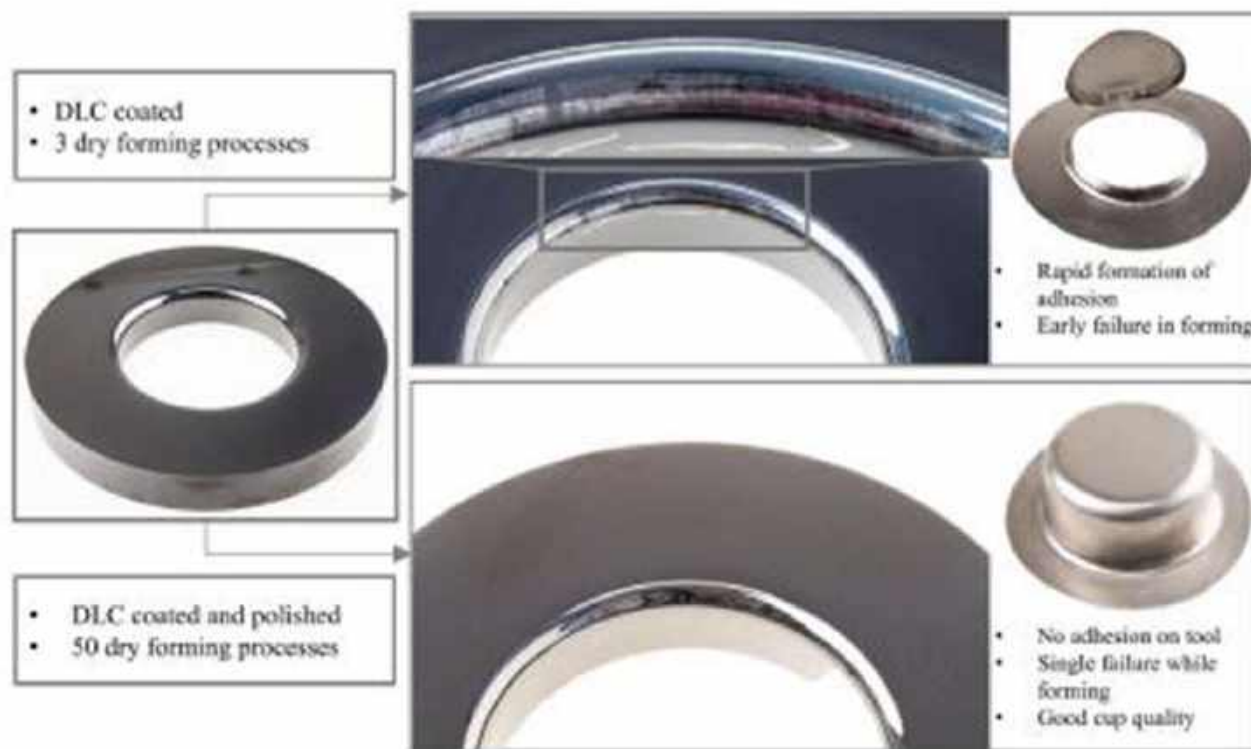


Рисунок 1.10 – Порівняння результатів експерименту [46]

Дослідження показали, що більшість змащувальних матеріалів знижують коефіцієнт тертя і зберігають такий самий коефіцієнт спрацювання сталевих листів, як і при сухих процесах.

Слід зазначити, що крім трибологічних властивостей устаткування, яке використовується в процесах листового штампування, форма і геометрія

використовуваного інструменту можуть мати значний вплив на якість штампованих виробів. Важливо розуміти вплив змінних процесу на розроблення інструментів для штампування, які забезпечують якісне штампування. У роботі [48] досліджувані носові ребра мають U-подібну геометрію, яка складалася з плоскої пластини, вигнутого фланця з різним радіусом кривизни та прямого фланця і виготовлялася методом штампування. У цьому дослідженні оцінювався вплив змінних процесу штампування на штампованість носового ребра для запобігання надмірного стоншення та контролю явища пружинення. Три важливі змінні процесу, а саме: зазор між тримачем та заготовкою, радіус ребра матриці та зазор між матрицею та пуансоном, були проаналізовані під час штампування носового ребра з Al-2024-O. Для перевірки результатів було проведено дев'ять експериментів і дев'ять вимірювань товщини кожного витягнутого стакану в різних місцях, як показано на рисунку 1.11, а. [49] Отриманий стакан для зручності розрізали на дві половини, як показано на рисунку 1.11, б.

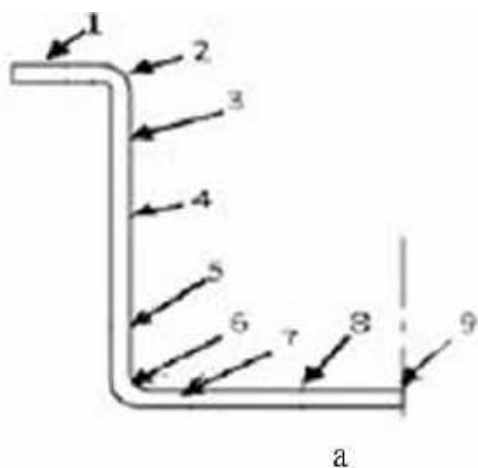


Рисунок 1.11 – Вимірювання товщини витянутого стакану: а – позиції вимірювання після розрізання витянутого стакану: б – розрізаний стакан [49]

Результати показали, що швидкість зменшення товщини та величина пружності добре узгоджуються з експериментальними даними, передбаченими моделюванням (рисунки 1.12). В роботі визначено: максимальну величину деформації, спричиненої пружиненням, зусилля притиску заготовки та необхідну початкову форму заготовки.

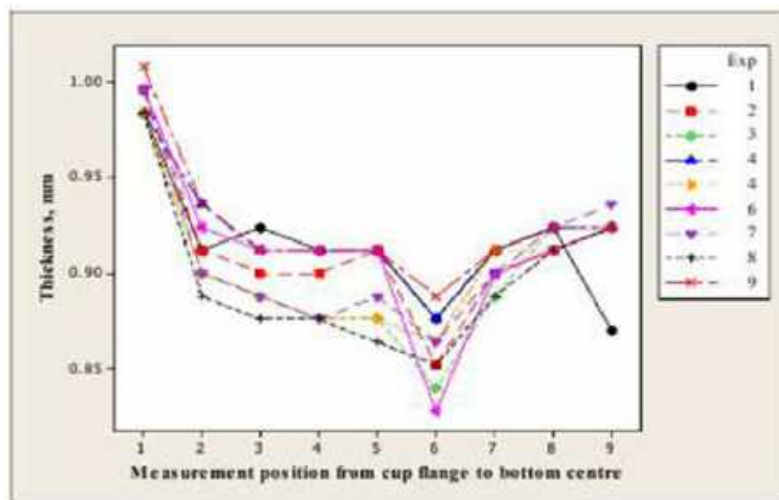


Рисунок 1.12 – Вимірювання товщини [49]

Автори в роботі [50] також проводили дослідження гарячого штампування листової заготовки AA6082-T4, де був розроблений новий набір інструментів. Вплив параметрів процесу, включаючи температуру штампування, швидкість штампування, коефіцієнт тертя та зусилля притиску заготовки, на здатність до штампування кількісно визначали за допомогою схеми Тагучі, дисперсійного аналізу (ANOVA) та математичної статистики. Скінченно-елементна модель була створена за допомогою програмного забезпечення Pamstamp для моделювання та аналізу їх впливу на мінімальну товщину та варіацію товщини гарячештампованої деталі. Встановлено, що основними факторами, які впливають на мінімальну товщину гарячештампованої деталі, є зусилля притиску заготовки та коефіцієнт тертя зі значущістю впливу 35,3% та 34,88% відповідно. Крім того, швидкість штампування та зусилля притиску заготовки суттєво впливають на відхилення товщини зі значущістю впливу 40,43% та 35,42% відповідно.

Практично у всіх дослідженнях, пов'язаних з листовим штампуванням, як правило використовують цифрове моделювання процесів, яке базується на методі скінченних елементів [51]. Це дозволяє значно зменшити витрати на виробництво виробів, зокрема дослідних зразків. Так автори [52] розглядали процес глибокого витягування з точки зору вибору оптимальної та ефективної послідовності дій та набору параметрів процесу.

Схема процесу та параметри, на які було звернено особливу увагу, показані на рисунку 1.13.

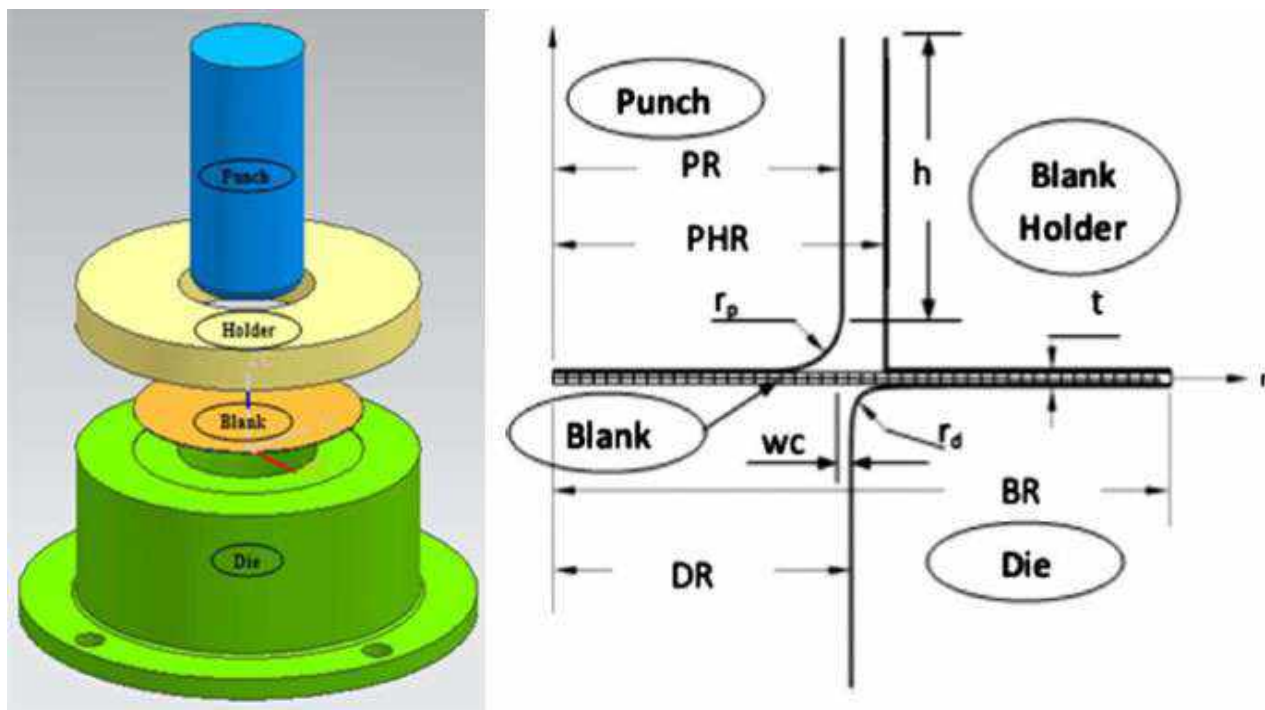


Рисунок 1.13 – Оснащення для штампування-витягування [52]

У ході моделювання авторами були отримані типові характеристики форми та змінення товщини частково витягнутої заготовки у 8 місцях (рисунки 1.14).

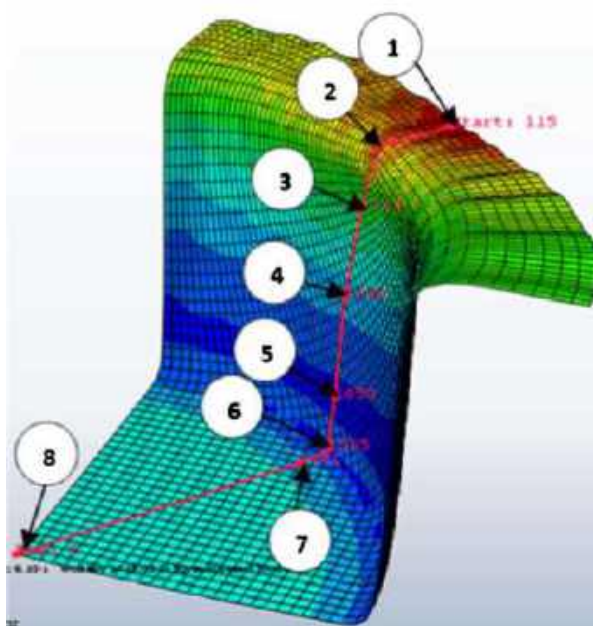


Рисунок 1.14 – Місця вимірювань товщини заготовки [52]

Результати показали, що на стоншення листового матеріалу певною мірою впливають вихідна товщина заготовки, зусилля тримача заготовки та радіус

перетяжного ребра матриці. Було встановлено, що товсті вихідні заготовки можуть розтягуватися більшою мірою зі збільшенням стоншення за рахунок більшого обсягу матеріалу. Також зазначено, що при зростанні зусилля тримача заготовки, збільшується навантаження на поверхні пуансона, проте цей процес обмежений деформацією бічної стінки.

Найбільшого стоншення заготовка може досягати на перетяжному ребрі матриці, тому авторами був запропонований діапазон параметрів, які рекомендуються для оптимального перебігу процесу (рисунок 1.15).

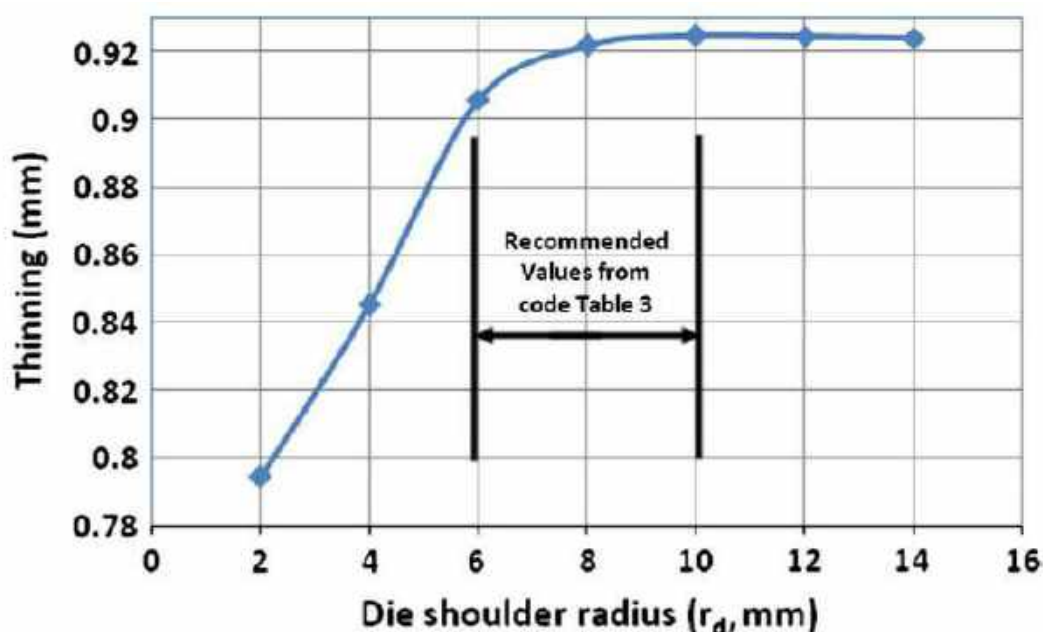


Рисунок 1.15 – Змінення стоншення листового металу в залежності від радіусу перетяжного ребра матриці [52]

1.4. Методи підвищення ефективності штампування листових деталей складної форми

Як показує аналіз існуючих досліджень, удосконалення процесу листового штампування досі залишається актуальним, велика увага приділяється впливу температури, змащувальних матеріалів, конфігурації штампового устаткування на процес листового штампування (рисунок 1.16).

Частина досліджень відображає можливість усунення дефектів на поверхнях готових виробів.



Рисунок 1.16 – Структурна схема напрямків досліджень у галузі листового штампування

Однак відомі методики визначення енергосилових параметрів в основному охоплюють опис деформованого стану тільки для ключових елементів листових деталей: «Фланець», «Стінка», «Дно». Мало вивчені процеси, що протікають у місці переходу від притисненої фланцевої частини до порожнини матриці для штампування-витягування. Оскільки в більшості випадків руйнування листового матеріалу при неправильно підібраних технологічних режимах у процесі штампування-витягування відбувається саме на перетяжному ребрі, вивчення питання визначення енергосилових параметрів на цій ділянці заготовки дозволить розширити технологічні можливості процесу листового штампування-витягування та забезпечувати якість виробів.

У теперішній час спостерігається тенденція все більш інтенсивного вдосконалення методів штампування, оснащення та устаткування для штампування. Виконано багато теоретичних та експериментальних робіт з

дослідження найбільш важливих факторів, що впливають на процес штампування-витягування, таких як змащення [53] та коефіцієнт тертя [54], радіус матриці [55], радіус пуансону [56], зусилля пуансону [57], властивості матеріалу [58], товщина матеріалу [59], розмір заготовки [60], крайки пуансону та матриці [61], швидкість пуансону [62]. Методи підвищення ефективності листового штампування наведені на рисунку 1.17.



Рисунок 1.17 – Методи підвищення ефективності листового штампування

На нашу думку, у розглянутих роботах не приділяється належної уваги перетяжним ребрам матриць та їх впливу на силові параметри процесу штампування-витягування. Як відомо, на перетяжному ребрі відбувається перехід від фланця до стінки заготовки та змінення напружено-деформованого стану. Це істотно впливає [63] на такі важливі параметри процесу витягування, як напруження в матеріалі, зусилля витягування, утворення складок [64], стоншення матеріалу стінки, граничний ступінь витягування і довговічність матриці [65]. Однак більшість авторів використовують спрощені формули для розрахунку складових деформацій, напружень та зусиль витягування [66, 67]. Як правило, ці рівняння не повною мірою відповідають фізиці металопластичної

течії на перетяжному ребрі матриці і не можуть бути використані для побудови та аналізу таких важливих характеристик, як компоненти деформацій, швидкості деформацій та інтенсивність деформацій, а також інтегральних характеристик, наприклад таких як, інтенсивність напружень. Отже, слід зробити висновок про те, що методи визначення деформованого стану заготовки та енергосилові параметри при штампування-витягування не повною мірою описують фактичний стан процесу.

Дані, наведені в розділі 1, опубліковано в роботах [5, 7, 11] зі списку публікацій Додатка А.

1.5 Висновки, постановка мети та задач дослідження

Аналіз розвитку авіаційної техніки показав, що питома вага листових деталей складної конфігурації постійно підвищується, збільшуються габарити деталей, ускладнюється їх форма, підвищується точність, використовуються тонколистові матеріали з міцних сплавів; через швидке моральне старіння виробів та його вдосконалення скорочуються терміни підготовки виробництва.

Листове штампування завдяки своїм перевагам у порівнянні з іншими методами задовольняє вимоги, обумовлені проблемою отримання листових деталей складної конфігурації найбільшою мірою. Висока якість деталей, що штампуються, обумовлена можливостями: отримання точності, порівнянної з точністю оброблення різанням, отримання складних форм, у т. ч. із закритими для преса порожнинами, застосування високоміцних матеріалів навіть для великогабаритних деталей. До того ж, засоби технологічного оснащення відрізняються простотою та дешевизною, а терміни їхньої технологічної підготовки мінімальні.

Методики визначення деформованого стану заготовки та енергосилових параметрів при штампуванні не повною мірою відображають дійсну картину процесу, що зумовило складність урахування впливу на нього гальмування ділянок заготовки, притиснутих відповідним зусиллям, а також ділянок

заготовки на переході від ділянки притиску в порожнину матриці (ребро матриці).

За результатами аналізу актуальності проблеми отримання листових деталей авіаційної техніки та на підставі проведеного аналітичного огляду досліджень з проектування технологічних процесів листового штампування-витягування, зроблених висновків, розроблено структурну схему досліджень у галузі листового штампування, встановлені мета та задачі досліджень.

Метою роботи є удосконалення технології штампування-витягування завдяки уточнення впливу технологічних факторів на силові параметри процесу деформування та якісні показники штампованих деталей.

Задачі дослідження:

1. З урахуванням конструктивно-технологічних властивостей деталей визначити шляхи інтенсифікації та методи підвищення ефективності процесу штампування-витягування листових авіаційних деталей складної форми.

2. Розробити математичну модель кінематики течії металу на ребрах матриць та визначити функціональний зв'язок між енергосиловими характеристиками деформування та параметрами режиму штампування-витягування.

3. Провести цифрове моделювання процесу штампування-витягування за допомогою LS-DYNA та перевірку адекватності цифрових моделей досліджуваних процесів, а також математичних моделей, отриманих при теоретичному дослідженні кінематики течії металу.

4. Експериментально дослідити вплив параметрів режимів штампування-витягування на якість одержуваних деталей та розробити рекомендації щодо розширення технологічних можливостей процесу штампування-витягування авіаційних деталей складної форми.

5. Провести оцінювання економічної ефективності удосконалення технології штампування-витягування авіаційних деталей складної форми порівняно з існуючими аналогами.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Устаткування для процесу штампування-витягування

2.1.1 Суть і технологічні особливості штампування-витягування

Штампування-витягування – операція, за допомогою якої із плоскої заготовки отримують порожнисті просторові деталі. При штампуванні-витягуванні заготовка протягується пуансоном через отвір матриці, в результаті чого периметр заготовки зменшується і плоска заготовка перетворюється в порожнистий виріб або напівфабрикат (перший перехід витягування), або ж порожнистий напівфабрикат отримує подальше зменшення поперечних розмірів при одночасному збільшенні його висотних розмірів (наступні переходи витягування). Штампуванням-витягуванням отримують деталі різних конфігурацій в плані і профілів у поперечних перерізах: вісесиметричні (циліндричні, конічні, з криволінійною твірною тощо), деталі, які мають площинну симетрію (коробчасті з плоскими бічними стінками, складної конфігурації тощо) і деталі не симетричні.

Виготовлення деталей штампуванням-витягуванням здійснюється в основному без нагрівання заготовки, в холодному стані. Однак заготовку з товстолистової сталі (товщиною більше 20 мм) перед витягуванням нагрівають для зниження деформівного зусилля. Нагріванню піддають і заготовки ряду сплавів, наприклад таких, як титанові, з метою підвищення їх пластичності.

За характером і ступенем деформації розрізняють:

- штампування-витягування без стоншення стінок;
- штампування-витягування зі стоншенням стінок;
- комбіноване штампування-витягування.

У першому випадку процес відбувається без заздалегідь обумовленого змінення товщини матеріалу стінки виробу, але при значному зменшенні діаметра заготовки; у другому – штампування-витягування здійснюється за

рахунок заздалегідь передбаченого зменшення товщини стінки деталі при незначному зменшенні його діаметра. Комбіноване штампування-витягування (третій випадок) характеризується одночасним значним зменшенням діаметра і товщини стінки напівфабрикату.

Великогабаритні тонкостінні деталі виготовляють різними методами, наприклад, вирубкою елементів, їх згинанням і наступним зварюванням. Але листове штампування є найбільш ефективним методом виготовлення деталей спеціального призначення, оскільки воно має технічні та економічні переваги перед іншими методами обробки металів тиском і різанням, які дають можливість:

- отримувати деталі досить складних форм, виготовлення яких іншими способами є неможливим або важко виконуваним;
- виготовляти міцні і жорсткі деталі з малою масою;
- штампувати взаємозамінні деталі при дотриманні точності їх виготовлення в межах встановлених допусків;
- досягати високої продуктивності з широкою можливістю механізації і автоматизації процесу штампування;
- мати порівняно малий відсоток відходів і браку (коефіцієнт використання металу досягає в середньому 75%).

Підвищена якість виготовлених деталей зумовила нові конструкторсько-технологічні властивості одержуваних деталей: за точністю і складністю формованих поверхонь, за габаритами виробів, за відотною товщиною і міцнісними властивостями використовуваного металу.

2.1.2 Експериментальна установка для штампування-витягування, її окремі вузли і системи

Прототипом для експериментальної установки став гідравлічний прес П-125, який призначено для статистичних випробувань на стиснення із зусиллям 125 тс.

Загальний вигляд пресу П-125 подано на рисунку 2.1. Установка складається з навантажувального пристрою та пульта управління. Навантажувальний пристрій призначений для механічного деформування чи руйнування зразків. З пульта управління можна задавати та контролювати режими деформації та руйнування.



Рисунок 2.1 – Вигляд установки

Навантажувальний пристрій, або власне прес, являє собою раму, що складається з основи 10 верхньої траверси 1 і двох нарізних колон 2 (рисунок 2.2).

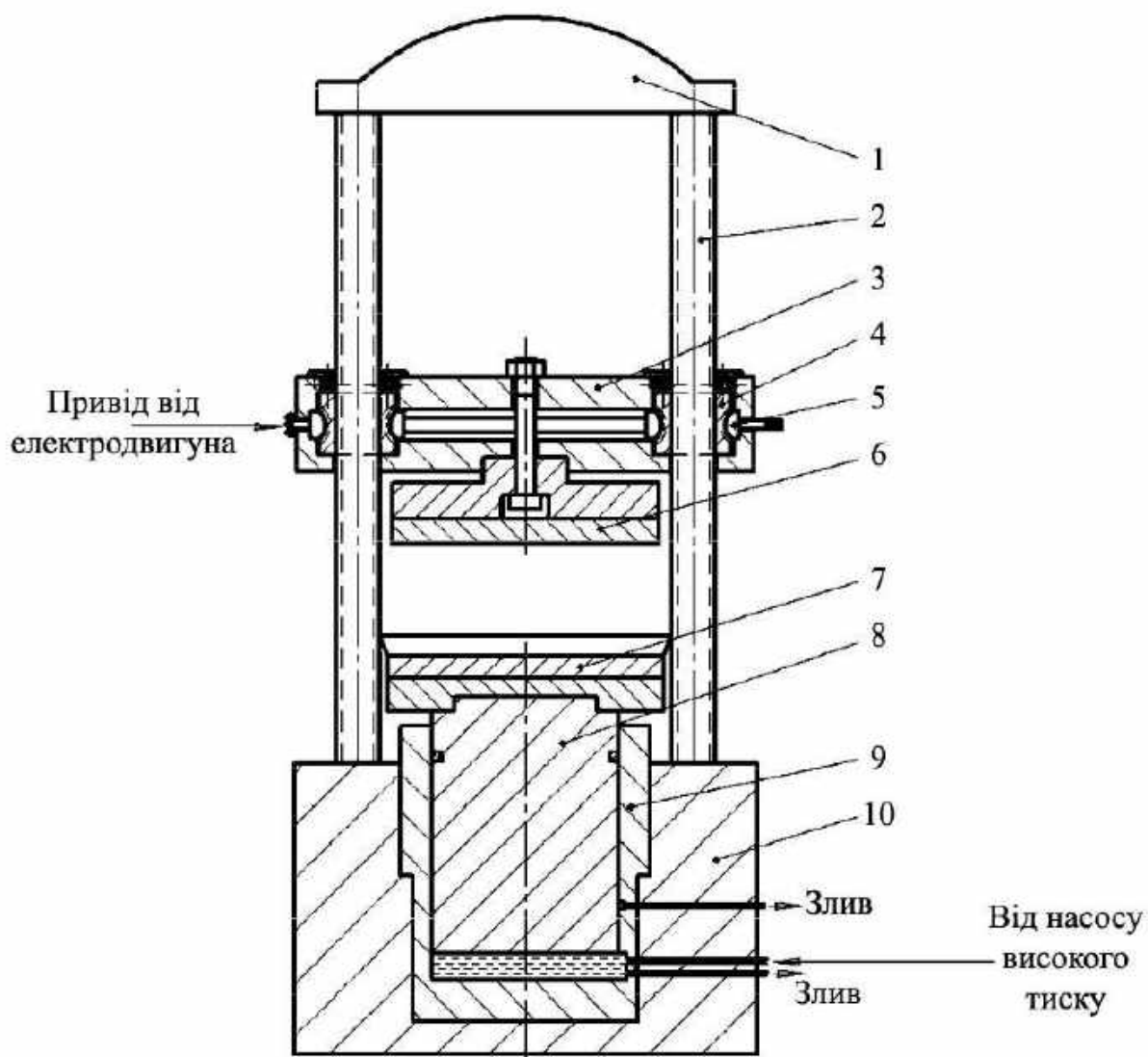


Рисунок 2.2 – Навантажувальний пристрій пресу П-125: 1 – верхня плита преса; 2 – колони преса; 3 – рухлива траверса; 4 – гайки на колонах; 5 – вал із черв’яками; 6 – верхня плита; 7 – стіл; 8 – плунжер гідроциліндра; 9 – гільза гідроциліндра; 10 – основа преса

На колонах змонтована рухома траверса 3. Її переміщення здійснюється за допомогою електричного двигуна і двох черв’ячно-гвинтових пар, що включають гайки 4 і валу з черв’яками 5. Рухлива траверса при холостому ході утримується на двох упорних кулькових підшипниках. Верхня плита преса закріплена на рухомій траверсі знизу за допомогою болта та гайки.

У станині преса розташований гідравлічний циліндр, який включає гільзу 9 і плунжер 8. Під дією тиску масла плунжер переміщається вгору. Для обмеження

ходу плунжера передбачена додаткова зливна труба, що скидає тиск масла після її досягнення. Для герметизації плунжера на нього встановлена гумова манжета, яка ущільнюється тим сильніше, чим вищий тиск масла.

При скиданні тиску масла у системі плунжер опускається вниз під власною вагою. На верхньому торці плунжера кріпиться нижня плита преса, яка служить робочим столом. Робочий стіл із трьох сторін має огорожувальні щитки, які перешкоджають падінню з нього деталей. На передній панелі робочого столу розташовується виконаний з товстого органічного скла захисний козирок, який захищає оператора та зручний для спостереження за ходом пресування.

Пульт управління є блоковою конструкцією. У верхній частині пульта управління змонтовано силовимірювальний пристрій, у нижній частині – насосна установка. На передній частині пульта керування розташовується панель керування пресом. Насосна установка включає бак і блок з гідроапаратурою. Для зручності обслуговування гідроапаратури верхня частина пульта управління кріпиться на шарнірах і може відкидатись убік. Навантажувальний пристрій з'єднується з пультом керування за допомогою трубопроводів. Масло від насоса високого тиску надходить у гідроциліндр преса і зливається назад у бак при холостому ході преса. Привід насоса високого тиску здійснюється від електродвигуна через клинопасову передачу. Напрямок обертання двигуна суворо визначено та показано стрілкою на його корпусі.

Технічні дані пресу П-125 наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні дані пресу П-125

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
Точність вимірювань	%	$\pm 2\%$ від виміряного навантаження
Граничне навантаження:		
– 1-й діапазон	кгс	50000
– 2-й діапазон	кгс	125000

Габаритні розміри:		
– довжина	мм	2320
– ширина	мм	840
– висота	мм	2340
– вага	кг	1925
Тип пресу	—	Двоколонний вертикальний
Швидкість руху плунжера робочого циліндра	мм/хв	0...20
Найбільший припустимий підйом плунжера робочого циліндра	мм	50
Найбільша відстань між опорними плитами	мм	700
Діаметр робочого циліндра	мм	225
Площа робочого циліндра	см ²	397,4
Розміри опорних плит	мм	400×400
Відстань між колонами	мм	470
Швидкість переміщення рухомої траверси	мм/хв	200

2.2 Особливості деформування металу при штампуванні-витягуванні

Аналіз процесу деформування при штампуванні-витягуванні розглянемо на прикладі витягування циліндричного стакану із плоскої круглої заготовки. У початковій стадії деформування пуансон, чинячи тиск на центральну частину заготовки, спричиняє її прогин. Зусилля, що діють з боку пуансона і матриці, зміщені в радіальному напрямку і утворюють згинальний момент, який прагне підняти фланець над верхнім торцем матриці. Подальше опускання пуансона призводить до виникнення меридіональних розтягувальних напружень, які

прагнуть втягнути фланець заготовки в отвір матриці (рисунок 2.3). Переміщення елементів фланця до отвору матриці супроводжується зменшенням радіусу і призводить до появи тангенціальних стисних напружень. Сукупна дія і переводить елементи фланця в пластичний стан. У той же час в стінках утворюваної деталі діє лінійна схема розтягування. Таким чином, при витягуванні пластична деформація локалізується у фланці, в той час як донна частина і стінка деталі деформуються пружно.

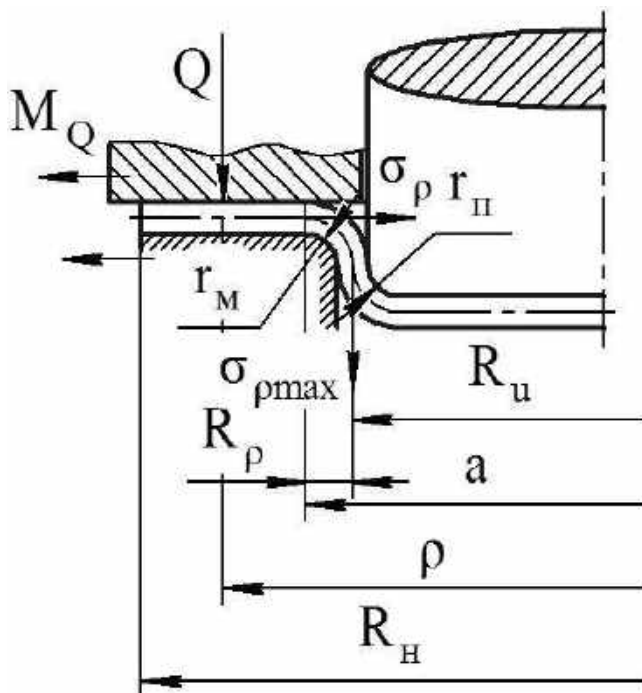


Рисунок 2.3 – Схема штампування- витягування

Штампування-витягування заготовки за наведеною схемою без додаткової опори фланця може здійснюватися лише при певних розмірах фланця, що забезпечують відсутність втрати стійкості фланця під дією стисних напружень, які призводять до гофрування.

При штампуванні-витягуванні без стоншення плоска заготовка перетворюється у порожнисту деталь без обумовленого змінення товщини матеріалу стінок. В цьому випадку показником штампувальності є мінімально можливий (граничний) для даного матеріалу коефіцієнт витягування

$$m_{\min} = \frac{d_{\text{дет}}}{D_{\text{заг}}}, \quad (2.1)$$

де $d_{\text{дет}}$ – діаметр деталі, мм;

$D_{\text{заг}}$ – найбільший діаметр заготовки, витягнутої без руйнування, мм.

Ступінь витягування K – величина, зворотна коефіцієнту витягування:

$$K = \frac{D_{\text{заг}}}{d_{\text{дет}}} = \frac{1}{m_{\text{min}}}. \quad (2.2)$$

Коефіцієнт витягування залежить від багатьох факторів:

- способу витягування (з притиском або без);
- якості матеріалу, розміру зерна, стану поверхні;
- товщини матеріалу δ_0 ;
- діаметра і форми виробу;
- радіусів заокруглення пуансона і матриці;
- зазору між матрицею і пуансоном;
- швидкості витягування на початку і в кінці операції;
- матеріалу штампа, стану поверхні його робочих частин, роду і ступеня змащення.

Найбільший вплив на коефіцієнт витягування надають радіуси заокруглень крайок матриці R_m і пуансона r_p . Чим більше ці радіуси, тим меншими можуть бути обрані коефіцієнти витягування. Радіуси заокруглень R_m і r_p визначають видом матеріалу, його товщиною, ступенем деформації, швидкістю витягування та висотою виробу, а величину – на основі дослідних даних.

Процес штампування-витягування більш ефективний, якщо забезпечується більший ступінь витягування, що досягається за один перехід [68]. Дійсний ступінь витягування, як правило, менше визначеного вище теоретичного, оскільки на його величину впливають зусилля тертя і умови навантаження заготовки.

Процес штампування-витягування відбувається у тому випадку, якщо робоче навантаження з боку пуансона долає опір матеріалу пластичній деформації і опір, спричинений реактивними зусиллями, що в сумі становить потрібне зусилля витягування. Якщо потрібного формоутворення за один перехід досягти не вдається, здійснюють багатоперехідний процес.

Величина допустимого формозмінення в кожному переході штампування-витягування в значній мірі залежить від умов деформування і зазвичай обмежується руйнуванням заготовки в процесі деформування. Втрата стійкості призводить до появи складок, зморшок, які деформують форму заготовки та отриманого виробу, а іноді і до руйнування, коли утворені складки застряють в зазорі між пуансоном і матрицею.

Складність і тривалість технологічного процесу отримання деталей штампуванням-витягуванням залежить від величини допустимого формозмінення заготовки за перехід, і цей технологічний параметр є основним при проектуванні технологічного процесу. Для оцінки ступеня впливу окремих факторів на величину допустимого формозмінення, на зусилля і роботу деформування, на можливість появи тих чи інших дефектів у штампованій деталі необхідно мати уявлення про механізм деформування заготовки в процесі штампування-витягування.

2.3 Вибір матеріалів дослідження

Матеріали, що використовуються в аерокосмічній галузі, повинні мати низку властивостей залежно від застосування, серед яких низька щільність, стійкість до високих температур і крихкості при низькій температурі, висока стійкість до корозії та низьке теплове розширення [69]. Аеронавтика та аерокосмічна промисловість висувають зростаючі технічні вимоги до матеріалів, що використовуються в цих галузях. Розвиток авіаційного транспорту і необхідність міжнародних далеких польотів потребували великого промислового прогресу, який призвів до створення літальних апаратів з високими технічними характеристиками. Аеронавігаційній промисловості довелося знайти рішення щодо матеріалів, які використовуються для виготовлення різних компонентів літака (наприклад, корпусу літака, деталей двигуна літака тощо), матеріалів (рисунок 2.4), які повинні мати дуже високу міцність і стійкість до втоми, що сприяло розвитку та використання у великих масштабах багатьох різних типів

алюмінієвих сплавів. В аерокосмічній техніці поширені алюмінієві сплави, які використовуються в ряді застосувань, а також деякі менш відомі сплави, з можливостями для майбутнього використання, як матеріали для авіації та аерокосмічної промисловості.

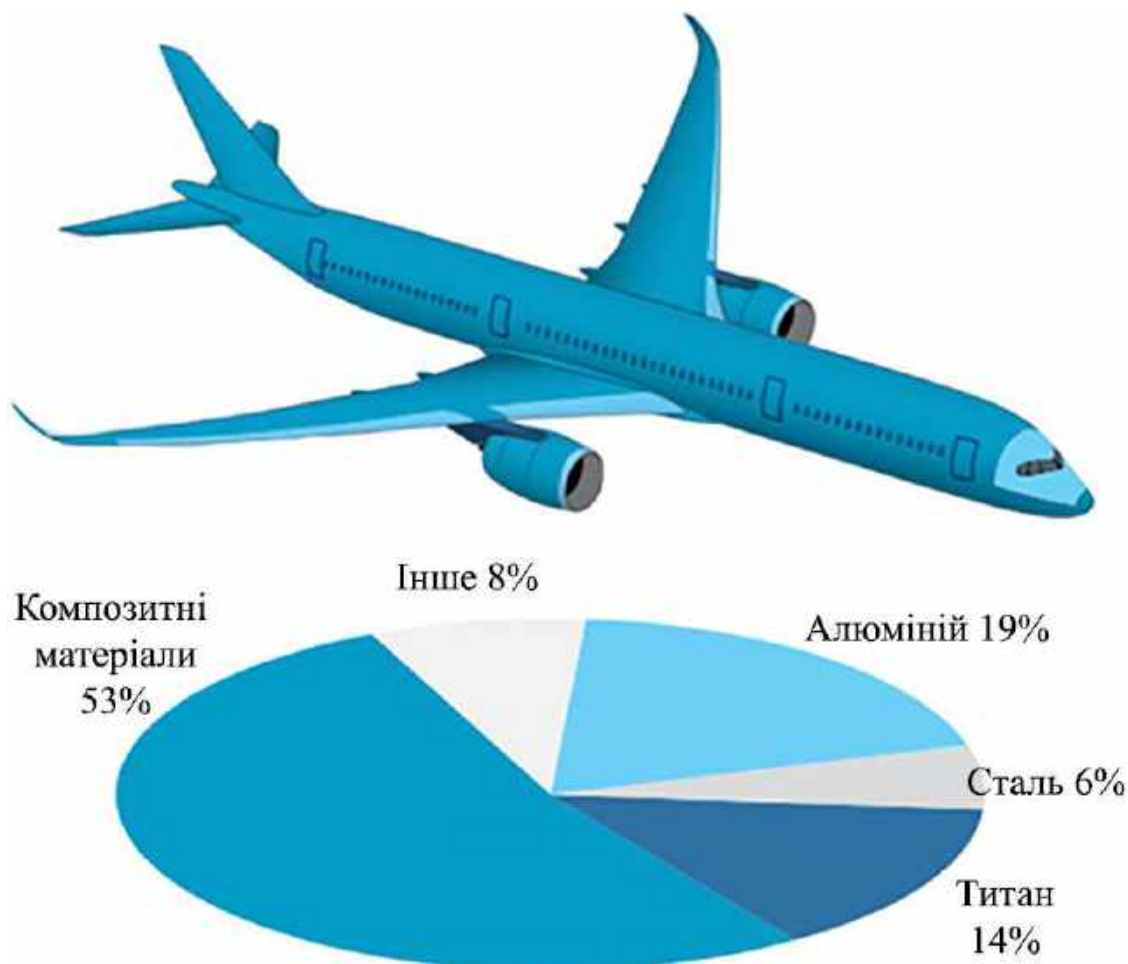


Рисунок 2.4 – Матеріали, які використовуються у сучасному літаку [70]

Властивості та характеристики алюмінієвих сплавів роблять деякі з них підходящим вибором для аерокосмічної промисловості з наступних причин:

- використання алюмінієвих сплавів для виготовлення деталей конструкції літаків дає їм значно меншу вагу. При щільності близько 35% щільності сталі використання алюмінієвих сплавів у конструкціях елементів конструкцій літаків зменшує їх загальну масу і тим самим дозволяє їм стати більш ефективними з точки зору витрати палива;

- висока механічна міцність деяких алюмінієвих сплавів дозволяє використовувати їх для замінення деяких компонентів і структурних елементів,

виготовлених з металевих матеріалів більшої щільності, зберігаючи при цьому механічну міцність цих металів і в той же час виграючи від меншої ваги компонентів. У цих умовах переваги використання високоміцних алюмінієвих сплавів сприяють підвищенню економічної ефективності процесу виготовлення;

– висока корозійна стійкість алюмінію та алюмінієвих сплавів рекомендує їх використання для виготовлення компонентів літаків, які працюють або контактують з різними корозійними середовищами (наприклад, солоня вода, різні хімічні речовини тощо, які з часом можуть мати небезпечний вплив на структуру цілісності літаків).

У порівнянні з більшістю сталей і алюмінієвих сплавів титанові сплави мають вищу питому міцність і корозійну стійкість. Титанові сплави знайшли все більше застосування в сучасних літаках; вони мають вищу температурну стабільність, ніж алюмінієві сплави, і вдвічі меншу вагу, ніж більшість сталей, на додаток до гарної втомної міцності, стійкості до розповсюдження тріщин і в'язкості руйнування.

Для авіаційних двигунів використовуються титанові сплави, міцніші за чистий титан, завдяки їх легкій вазі, високій міцності (високій питомій міцності) і термостійкості. Алюмінієві сплави з високою питомою міцністю рідко застосовуються в авіаційних двигунах, тому що їх міцність різко падає при температурах близько 200 °C і вище. Хоча питома міцність титанових сплавів погіршується при підвищенні температури, їх питома міцність перевершує міцність сплавів на основі Ni в діапазоні температур 500-600 °C. Титановий сплав в основному використовується для вентилятора та компресора в передній частині, де температура відносно низька (600°C або нижче). Для турбіни та камери згоряння в задній половині секції, де температури вищі, використовується сплав на основі нікелю або сплав на основі заліза.

Виходячи з вищесказаного у межах цього дослідження були вибрані сплави з найбільш вивченими властивостями:

- титановий сплав ОТ4;
- алюмінієві сплави АМг, АМц, Д16Т.

2.4 Дослідження енергосилових параметрів процесу штампування-випрямлення і якості виробів

Корозійностійкі жароміцні та жаростійкі сплави, які широко використовуються в авіаційному двигунобудуванні та характеризуються високою міцністю разом із значною в'язкістю, відносяться до групи матеріалів, складних для оброблення різанням. До того ж, ці жароміцні сплави мають властивість до істотного зміцнення поверхні під час оброблення лезовим інструментом, що спричиняє підвищення зусиль різання і швидке спрацювання різального інструменту. У зв'язку з цим, одним із ключових напрямів удосконалення сучасних технологій виготовлення деталей авіаційних двигунів є зменшення обсягу процесів зняття металу та їх заміна методами точного поверхневого або об'ємного формування деталей із подальшим мінімальним різанням.

Під час операцій листового штампування пластичні деформації, які забезпечують потрібну форму змінювання, зазвичай виникають лише в окремій частині заготовки – осередку деформації. Напружено-деформований стан в осередку деформації є неоднорідним, тобто напруження в границях осередку змінюються залежно від координат у кожний момент процесу. [16, 71].

Величина та розподіл напружень в осередку деформації визначаються багатьма чинниками, пов'язаними з розмірними параметрами заготовки й інструмента, умовами контакту під час деформування, а також температурно-швидкісними режимами деформування тощо [16, 72].

Рівень допустимого формозмінення під час операцій формозміни в листовому штампуванні обмежується або руйнуванням заготовки, або втратою її стійкості, що спричиняє недопустиму деформацію форми.

Оскільки зусилля деформування, а в окремих випадках і рівень допустимого формозмінення залежать від напруженого стану в осередку деформації, визначення розподілу напружень та енергосилових характеристик в осередку деформації має бути одним з головних завдань під час аналізу операцій

листового штампування [73].

Для результативного прогнозування енергосилових показників різних способів оброблення тиском, зокрема й листового штампування, потрібно створити математичні моделі, які відображають взаємозв'язок функціональних параметрів процесу з технологічними характеристиками режимів оброблення. Коректне формування такої моделі можливе за умови розроблення структурно-логічної схеми, що визначає методику та послідовність проведення теоретичних і експериментальних досліджень.

Розрахунок осередку деформації потребує прийняття гіпотези про суцільну структуру матеріалу, а основною метою кінематики течії в цьому випадку є встановлення поля швидкостей частинок. Для виведення необхідних рівнянь, що описують поле швидкостей під час листового штампування, можуть застосовуватись класичні методи координатних сіток, накладення потоків або конформних перетворень. Кожен із вказаних методів має свої обмеження і потребує введення припущень, які іноді суттєво викривляють фізичну суть процесу. Наприклад, метод координатних сіток базується на визначенні функції течії шляхом апроксимації траєкторій руху частинок металу, отриманих з експериментальних досліджень. У зв'язку з цим метод є досить складним у використанні й не може вважатися універсальним [74].

Метод накладення потоків також не відповідає нашим вимогам через складність реалізації і відсутність простоти та зручності у застосуванні. До того ж, як метод накладення, так і потужний метод конформних перетворень, який ґрунтується на математичному апараті теорії функцій комплексної змінної, придатні лише для визначення поля швидкостей потенціальних течій. Цього цілком достатньо для розв'язання задач аеродинаміки в теорії легкообтічних тіл, проте такий підхід є некоректним при моделюванні течії металу в процесі листового штампування-витягування, оскільки пружно-пластичне деформування листового матеріалу неминуче спричиняє переміщення різноманітних дефектів кристалічної решітки, що веде до дисипації енергії деформації з майже повним її перетворенням у тепло, а отже – до виникнення значних зусиль внутрішнього

тертя, нехтувати якими в цьому випадку неможливо. Наявність істотних зусиль внутрішнього тертя допускає обертальний рух частинок металу під час деформування, і тому сам рух не може вважатися потенціальним [74].

У зв'язку з цим постала потреба у створенні методу визначення полів швидкостей у процесі листового штампування, який би повністю відображав фізичну суть процесу та водночас був достатньо простим і зручним для використання в інженерних розрахунках.

Найбільш відповідними для моделювання процесів пластичної деформації є підходи, засновані на замкненій системі рівнянь механіки суцільного середовища, які були запропоновані та розвинені у працях Ю. М. Алексєєва [16, 72]. У цьому підході деформований метал розглядається як ідеалізоване суцільне середовище з усередненими механічними характеристиками реального металу.

Теоретичне дослідження більшості технологічних процесів разом із виконаними експериментальними дослідженнями дає змогу встановити закономірність залежності швидкості переміщення частинок пластично деформованого металу від просторових координат. Швидкість частинок може бути виражена за допомогою вектора швидкості [71, 72]

$$\vec{V} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}. \quad (2.3)$$

Поле швидкостей, з урахуванням його нестисливого характеру в цій зоні, має бути соленоїдним або ротаційним [74]

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0; \quad \operatorname{rot} \vec{v} \neq 0. \quad (2.4)$$

Застосовуючи рівняння (2.3) і (2.4), можна встановити функціональну залежність швидкості від координат. У такий спосіб визначається поле швидкостей частинок матеріалу, що дає змогу обчислювати деформаційні швидкості та їх інтенсивність за відповідними формулами

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial q_2} + \frac{V_3}{H_1 H_3} \frac{\partial H_1}{\partial q_3}; \\ \varepsilon_{12} &= \frac{1}{H_2} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} + \frac{1}{H_1} \frac{\partial V_2}{\partial q_1} - \frac{V_1}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial q_2} - \frac{V_2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

де q_1, q_2, q_3 – ортогональні криволінійні координати.

У цьому випадку виконуються рівняння зв'язку

$$x = x(q_1, q_2, q_3), y = y(q_1, q_2, q_3), z = z(q_1, q_2, q_3);$$

$$H_k = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial x_i}{\partial q_k} \right)^2}; \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)}.$$

Тут H_k – коефіцієнти Ламе.

Далі слід обчислити компоненти деформації, щоб отримати параметри енергосилового процесу

$$\begin{aligned} e_{11} &= \int \varepsilon_{11} dt, \\ e_{12} &= \int \varepsilon_{12} dt \end{aligned} \quad (2.7)$$

та інтенсивність деформації

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{22} - e_{33})^2 + (e_{33} - e_{11})^2 + \frac{3}{2}(e_{12}^2 + e_{23}^2 + e_{31}^2)}. \quad (2.8)$$

Однією з ключових характеристик процесів оброблення металів тиском є робота деформації, яка дає змогу встановлювати силові параметри. Повна робота деформації обчислюється шляхом інтегрування елементарної роботи за об'ємом v

$$A = \int_t \int_v \left(\rho V \frac{\partial V}{\partial t} + P_x \frac{\partial V}{\partial x} + P_y \frac{\partial V}{\partial y} + P_z \frac{\partial V}{\partial z} \right) dv dt. \quad (2.9)$$

Дві функції було введено в [72]. Перша називається функцією швидкості

$$L = \rho V \frac{\partial V}{\partial t}. \quad (2.10)$$

Друга функція у рівнянні (2.9) виражає функцію дисипації енергії

$$E = P_x \frac{\partial V}{\partial x} + P_y \frac{\partial V}{\partial y} + P_z \frac{\partial V}{\partial z}. \quad (2.11)$$

Функція швидкості являє собою роботу, яка спрямована на приріст кінетичної енергії елементарного об'єму металу під час деформації. Функція енергорозсіювання полягає в тому, що частина цієї роботи витрачається на саму деформацію матеріалу. З урахуванням рівнянь (2.10) і (2.11), перепишемо

рівняння (2.9) у наступному вигляді

$$A = \int \int \int \int (L + E) d\upsilon dt. \quad (2.12)$$

Коли деформація відбувається з малою швидкістю, значення функції швидкості є досить незначним порівняно з функцією дисипації енергії і її можна не враховувати. У такому разі робота деформації визначатиметься через функцію дисипації енергії

$$A = \int \int \int \int E d\upsilon dt. \quad (2.13)$$

Робота деформації елементарного об'єму металу, що віднесена до октаедричних вузлів, записується у такій формі

$$dA = 3\tau_{\text{oct}} \gamma_{\text{oct}} d\upsilon dt, \quad (2.14)$$

де τ_{oct} – напруження зсуву на октаедричній ділянці, тобто платформі, нахилений до головних осей; γ_{oct} – швидкість октаедричної деформації.

Октаедричне напруження пов'язане з інтенсивністю напруження як

$$3\tau_{\text{oct}} = \sqrt{2}\sigma_i. \quad (2.15)$$

Рівняння, яке встановлює зв'язок між швидкістю октаедричної деформації та інтенсивністю швидкості деформації, має такий вигляд

$$\gamma_{\text{oct}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \varepsilon_i. \quad (2.16)$$

Підставивши рівняння (2.15) і (2.16) у рівняння (2.14) та виконавши інтегрування останнього за об'ємом і часом, отримуємо

$$A = \int \int \int \int \sigma_i \varepsilon_i d\upsilon dt. \quad (2.17)$$

При порівнянні формул (2.13) і (2.17), можна встановити, що

$$E = \sigma_i \varepsilon_i. \quad (2.18)$$

Щоб визначити потужність деформації, функцію дисипації енергії (2.18) слід інтегрувати лише за об'ємом

$$N = \int \int \int E d\upsilon. \quad (2.19)$$

Отже, можна визначити поле напружень, деформацій та енергосилові характеристики процесу, застосовуючи основні закони пластичної деформації та

рівняння механіки суцільного середовища, за умови наявності даних про компоненти швидкостей часток деформованого металу під час процесу листового штампування.

2.5 Показники якості деталей, виготовлених штампуванням-витагуванням

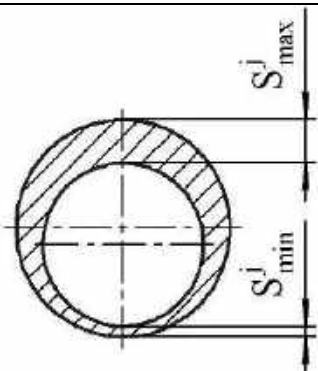
Якість деталей це сукупність найбільш істотних властивостей деталі (експлуатаційних, конструктивних, технологічних, економічних тощо), які задовольняють певним вимогам відповідно до її призначення.

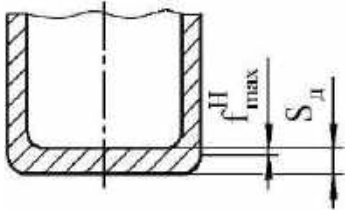
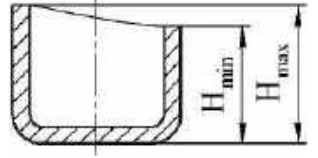
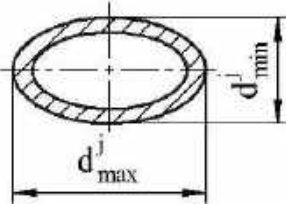
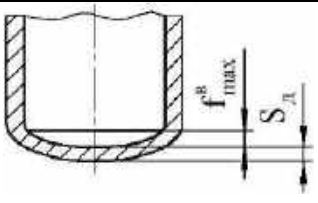
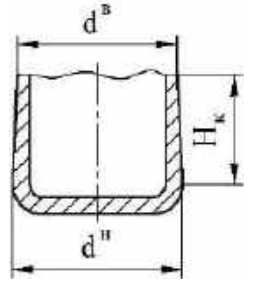
При виготовленні деталей штампуванням-витагуванням якість деталей оцінюють за наступними параметрами:

- відхилення форми;
- відхилення контрольованих розмірів деталі від розмірів робочого інструмента;
- шорсткість контрольованої поверхні;
- наявність дефектів (подряпини, тріщини, гофри тощо);
- механічні властивості.

Для оцінки якості приймають такі показники, як різностінність, кривина, овальність, вигнутість, увігнутість, опуклість, конусність. Схеми визначення та розрахункові формули зазначених показників якості наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. – Показники відхилення форми

Найменування відносного показника	Розрахункова формула	Схема відхилення
Різностінність	$\delta_s^j = \frac{S_{\max}^j - S_{\min}^j}{S_{\text{cp}}^j} \cdot 100$	

Опуклість	$\delta_D^H = \frac{f_{\max}^H}{S_D} \cdot 100$	
Кривина	$\delta_H = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\text{cp}}} \cdot 100$	
Овальність	$\delta_d^j = \frac{d_{\max}^j - d_{\min}^j}{d_{\text{cp}}^j} \cdot 100$	
Увігнутість	$\delta_D^B = \frac{f_{\max}^B}{S_D} \cdot 100$	
Конусність	$\delta_K = \frac{d^B - d^H}{2H_K}$	

де j – номер контрольного перерізу.

Оцінку якості деталей за формою можна виконувати за регламентованими значеннями граничних відхилень форми та ступеням точності [75]. Основними контрольованими розмірами є зовнішні діаметри та товщини стінок у верхньому та нижньому контрольних перерізах, висота деталі та товщина дна. Якість деталей по контрольованим параметрам оцінюють зіставленням із дійсними виконавчими розмірами робочого інструмента. При цьому визначають абсолютні та відносні відхилення контрольованих розмірів:

$$\Delta P_i = P_{\text{ді}} - P_{\text{іні}}; \delta P_i = \frac{\Delta P_i}{P_{\text{іні}}} \cdot 100\%, \quad (2.20)$$

де $P_{ді}$, $P_{іні}$ – контрольовані розміри деталі і інструмента відповідно; i – порядковий номер контрольованого розміру.

Шорсткість контрольованих поверхонь оцінюється прийнятою номенклатурою параметрів R_z , R_a , R_{max} , відповідно до чинних стандартів [76].

Дефектом називають кожну окрему невідповідність деталі вимогам, встановленим нормативною документацією [77]. Явні поверхневі дефекти виявляють візуальним оглядом. У залежності від ступеня впливу дефекта на технологічні та експлуатаційні властивості заготовки і деталі розрізняють незначні, значні та критичні, при наявності яких подальше деформування не можливе (наприклад, утворення тріщини). За походженням розрізняють дефекти металургічні, які виникають під час ливарного процесу або прокатки, та технологічні, які виникають при витягуванні: гофри, зморшки, поздовжні та поперечні тріщини, забоїни, подряпини, надриви, задирки, облої, кільцеві відбитки та ін.

Дані, наведені у розділі 2, опубліковано у роботах [2, 10, 12] зі списку публікацій Додатку А.

2.6 Висновки

1. Подано опис експериментальної установки для штампування-витягування та технологічного оснащення, обґрунтовано вибір матеріалів заготовок для експериментальних досліджень.

2. Розглянуто особливості деформування металу при штампуванні-витягуванні та запропоновано метод розрахунку енергосилових параметрів процесу пластичного деформування металів, що ґрунтується на замкнутій системі рівнянь механіки суцільних середовищ.

3. Проаналізовано показники якості деталей, виготовлених штампуванням-витягуванням та запропоновано методику оцінювання якості деталей, які одержують штампування-витягуванням.

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ ПРИ ФОРМОУТВОРЮЮЧИХ ОПЕРАЦІЯХ ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ

3.1 Задачі моделювання процесів пластичної течії металу

Найважливішим загальним завданням будь-якого виду оброблення металів є визначення основних технологічних параметрів, до яких можна віднести енергосилові характеристики, такі як деформівні зусилля, робота, потужність, а також оптимальні параметри режиму оброблення. Операції оброблення металів тиском [78] відрізняє значущість таких складових як максимально допустимий ступінь деформації заготовки [79], а також її форма та вихідні розміри [80].

Під оптимальними технологічними параметрами режиму [81, 82] слід розуміти такі параметри обробки, які при максимальній продуктивності [83], гарантують як мінімум необхідну якість виробів, а в ідеалі – найбільш сприятливі характеристики поверхневого шару [84, 85], що забезпечують підвищення ресурсних характеристик та нівелюють негативний вплив технологічної спадковості [86] попередніх операцій. Реальні технологічні процеси містять операції, в яких режими обробки не можливо назвати оптимальними [87, 88], тому необхідність забезпечення якості поверхневого шару [89] змушує призначати режими обробки, які йдуть на шкоду продуктивності [90].

Детермінованість енергосилових характеристик є основою до призначення технологічних режимів обробки [91, 92], тому саме від величини цих факторів залежить вибір устаткування та оснащення операції, а також якість одержуваних деталей. Розрахунок енергосилових характеристик неможливо виконати без визначення напружено-деформованого стану металу в процесі оброблення [72]. Виходячи з вище наведених міркувань, можна зробити висновок, що для ефективного прогнозування енергосилових характеристик різних процесів та операцій оброблення тиском необхідно розробити математичні моделі, що

відображають взаємозв'язок функціональних характеристик процесу з технологічними параметрами режимів оброблення. Правильна побудова моделі можлива, якщо буде розроблено структурно-логічну схему, яка визначає методи та послідовність теоретичних та експериментальних досліджень. Найбільш підходящими для розрахунку процесів пластичної деформації є методи, що ґрунтуються на замкнутій системі рівнянь механіки суцільного середовища [10, 93]. У цьому випадку метал, що деформується, розглядається як ідеалізоване суцільне середовище з усередненими механічними властивостями реального металу. Фактично, в цьому випадку для опису процесу деформації вводиться чотиривимірний простір, а процес деформації в цілому можна описати, ввівши функцію чотирьох змінних, яка описує поле швидкостей переміщень. У більшості випадків при вирішенні прикладних технологічних завдань для побудови шуканого поля швидкостей можна обійтися функціями двох або трьох змінних, особливо при описі стаціонарних процесів. Аналіз кінематики процесу та вихідних передумов, а також раціональний вибір системи координат дають можливість досить швидко отримати поле швидкостей переміщень і на його основі розрахувати напружено-деформований стан металу та енергосилові характеристики.

Процес формоутворення, який забезпечує формування нової поверхні, супроводжується значними пружнопластичними деформаціями, швидкостями деформацій, зусиллями тертя по контактних поверхнях інструменту, підвищенням твердості шарів металу, що деформується, і значним тепловиділенням у контактній зоні [94]. Виникнення та розвиток у зоні деформування механічних, теплових та термомеханічних явищ супроводжує перебіг таких важливих контактних процесів як адсорбція, адгезія, десорбція, окислювально-відновлювальні процеси та інші. Весь цей комплекс явищ значно впливає на спрацювання інструменту і якість оброблюваної поверхні [95]. Тому важливим завданням формоутворення листових деталей є моделювання поведінки металу, що деформується, на елементах інструментального штампу складної геометрії при різних технологічних операціях листового штампування,

в умовах значних пластичних деформацій.

Велика різноманітність геометричних форм інструментальних штамів, які знаходять широке застосування у сучасній обробці металів тиском, потребує побудови полів швидкостей, які б описували контакт листового матеріалу з поверхнями інструментального оснащення [96]. Детальний опис такого контакту потребує розбивки контактної поверхні інструменту на елементарні складові, картина полів швидкостей при обтіканні яких відома, з подальшою побудовою інтегральної картини, яка враховує особливості геометрії інструментальних штамів та кінематики течії металу.

Якщо проаналізувати макроструктуру металу та напрямок волокон у деталі після операцій оброблення тиском [97-99], легко помітити, що напрямок течії металу при деформуванні може бути апроксимований гіперболою так само, як і течія металу стружки при різанні. Разом з цим різноманіття операцій оброблення металів тиском – від розділових операцій і пробивання до багаторівнякового штампування, у тому числі інструменту, що застосовується при цьому, ставить завдання пошуку апроксимуючої кривої течії для кожної операції індивідуально. Найчастіше, шукану криву неможливо описати однією гілкою гіперболи [100] (рисунок 3.1) у межах обраної системи координат. Крім того, при окремих операціях оброблення металів тиском застосовується інструмент, робоча поверхня якого або її частина являє собою коло або дугу.



Рисунок 3.1 – Текстура деформації металу після кування[98]

На наш погляд, все різноманіття ліній течії металу при обтіканні таких елементів інструментальних штамів, як рифти, пукльовки, фасонні або рельєфні елементи, можна звести до вирішення кількох завдань, що задовільно описують поведінку металу при деформуванні, а саме: обтікання клина та площини.

3.1.1 Обтікання гострого клина

Для зручності роботи, тут і нижче за текстом позначення у параметричних рівняннях, які описують координати та складові швидкості, маркуватимемо індексами, що відповідають положенню кривої в квадрантах площини. При цьому перша цифра позначає квадрант початку руху вздовж кривої, а друга – закінчення.

Пластична течія металу при заглибленні клина у жорсткопластичне тіло має симетрію та геометричну подібність відносно осі симетрії клина, що цілком очевидно і підтверджується нещодавно розробленою авторами роботи [101] моделлю кристалопластичності з градієнтним посиленням. Така течія найбільш характерна для роздільних операцій оброблення металів тиском або різанням.

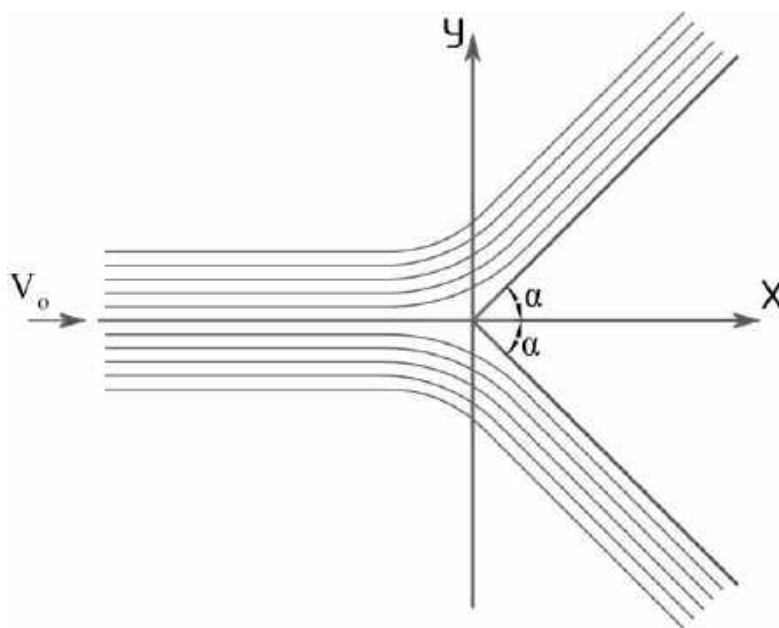


Рисунок 3.2 – Схема ліній течії при обтіканні клина

Рівняння гілок гіпербол, що лежать у квадрантах 2-1, можна записати системою рівнянь:

$$\begin{cases} x_{21}(t) = a \sinh(\omega t + C) \cos \alpha + b \cosh(\omega t + C) \sin \alpha; \\ y_{21}(t) = -a \sinh(\omega t + C) \sin \alpha + b \cosh(\omega t + C) \cos \alpha. \end{cases} \quad (3.1)$$

де ω і C – деякі сталі;

t – час;

a – параметр гіперболи, велика піввісь;

b – параметр гіперболи, мала піввісь.

Складові швидкості руху отримані диференціюванням системи (3.1) за часом

$$\begin{cases} V_{x21}(t) = a\omega \cosh(\omega t + C) \cos \alpha + b\omega \sinh(\omega t + C) \sin \alpha; \\ V_{y21}(t) = b\omega \sinh(\omega t + C) \cos \alpha - a\omega \cosh(\omega t + C) \sin \alpha. \end{cases} \quad (3.2)$$

Поле швидкостей течії частинок при обтіканні крайки клина може бути подане у вигляді:

$$\begin{cases} V_{x21}(x, y) = V_0 [\omega(x, y)]^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{(x \cos \alpha + y \sin \alpha) e^2 \sin \alpha + y}{\sqrt{e^2 - 1}} \right]; \\ V_{y21}(x, y) = -V_0 [\omega(x, y)]^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{(x \cos \alpha + y \sin \alpha) e^2 \cos \alpha - x}{\sqrt{e^2 - 1}} \right]; \\ \omega(x, y) = -\frac{e^2 \left[x_0 \cos \alpha + \sqrt{\sin^2 \alpha (1 - e^2)} [a(x, y)]^2 (e^2 \sin^2 \alpha - 1) - x_0^2 \right]^2}{(1 - e^2 \sin^2 \alpha)^2} + \\ + [a(x, y)]^2; \\ a(x, y) = \sqrt{\frac{(x \cos \alpha - y \sin \alpha)^2 e^2 - (x^2 + y^2)}{(1 - e^2)}}. \end{cases} \quad (3.3)$$

де V_0 – швидкість інструменту; e – ексцентриситет гіперболи; x_0 – координата, яка визначає початок пластичної течії.

Для того щоб отримати рівняння гілок гіпербол, розташованих у квадрантах 3-4, необхідно в рівнянні $y(t)$ системи (3.1) змінити знаки на протилежні, тоді отримаємо:

$$\begin{cases} x_{34}(t) = a \sinh(\omega t + C) \cos \alpha + b \cosh(\omega t + C) \sin \alpha; \\ y_{34}(t) = a \sinh(\omega t + C) \sin \alpha - b \cosh(\omega t + C) \cos \alpha. \end{cases} \quad (3.4)$$

Система (3.2) набуде вигляду:

$$\begin{cases} V_{x34}(t) = a\omega \cosh(\omega t + C) \cos \alpha + b\omega \sinh(\omega t + C) \sin \alpha; \\ V_{y34}(t) = a\omega \cosh(\omega t + C) \cos \alpha - b\omega \sinh(\omega t + C) \sin \alpha. \end{cases} \quad (3.5)$$

Поле швидкостей течії частинок металу при обтіканні крайки набуде вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{x34}(x, y) = V_0 [\omega(x, y)]^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{(x \cos \alpha + y \sin \alpha) e^2 \sin \alpha - y}{\sqrt{e^2 - 1}} \right]; \\ V_{y34}(x, y) = -V_0 [\omega(x, y)]^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{-(x \cos \alpha - y \sin \alpha) e^2 \cos \alpha + x}{\sqrt{e^2 - 1}} \right]; \\ \omega(x, y) = \frac{e^2 \left[x_0 \cos \alpha + \sqrt{\sin^2 \alpha (1 - e^2)} \left([a(x, y)]^2 (e^2 \sin^2 \alpha - 1) - x_0^2 \right) \right]^2}{(1 - e^2 \sin^2 \alpha)^2} + [a(x, y)]^2; \\ a(x, y) = \sqrt{\frac{(x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2 e^2 - (x^2 + y^2)}{(1 - e^2)}}. \end{array} \right. \quad (3.6)$$

3.1.2 Обтікання пластини при горизонтальній та вертикальній складових

Обтікання пластини при горизонтальній складовій.

Рівняння гіперболи, розташованої в квадрантах 2-1, ідентичне раніше отриманим системам (3.1) – (3.3). Для отримання рівняння гілок гіпербол, розташованих у 3-му квадранті у вигляді системи (3.1), скористаємося таким алгоритмом. По-перше, у прийнятій системі координат необхідно змінити знак у рівнянні $y(t)$ системи (1), по-друге необхідно врахувати, що істинний кут $[\gamma] = \pi - \gamma$, а істинний $[\alpha] = -\frac{\pi}{2} + \frac{\gamma}{2}$, але враховуючи, що $\alpha = -\frac{\gamma}{2}$, $[\alpha] = -\frac{\pi}{2} - \alpha$, параметр гіперболи $b_{33} = a \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi - \gamma}{2}\right) = \frac{a^2}{b}$. Після підстановки $[\alpha]$ та b_{33} до системи (3.1), отримуємо рівняння, які описують шукану траєкторію руху

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{33}(t) = -a \sinh(\omega t + C) \sin \alpha - \frac{a^2}{b} \cosh(\omega t + C) \cos \alpha; \\ y_{33}(t) = -a \sinh(\omega t + C) \cos \alpha + \frac{a^2}{b} \cosh(\omega t + C) \sin \alpha. \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Диференціюванням системи (3.7) за часом отримаємо швидкості

$$\begin{cases} V_{x33}(t) = -\omega \left[a \cosh(\omega t + C) \sin \alpha + \frac{a^2}{b} \sinh(\omega t + C) \cos \alpha \right]; \\ V_{y33}(t) = \omega \left[\frac{a^2}{b} \sinh(\omega t + C) \sin \alpha - a \cosh(\omega t + C) \cos \alpha \right]. \end{cases} \quad (3.8)$$

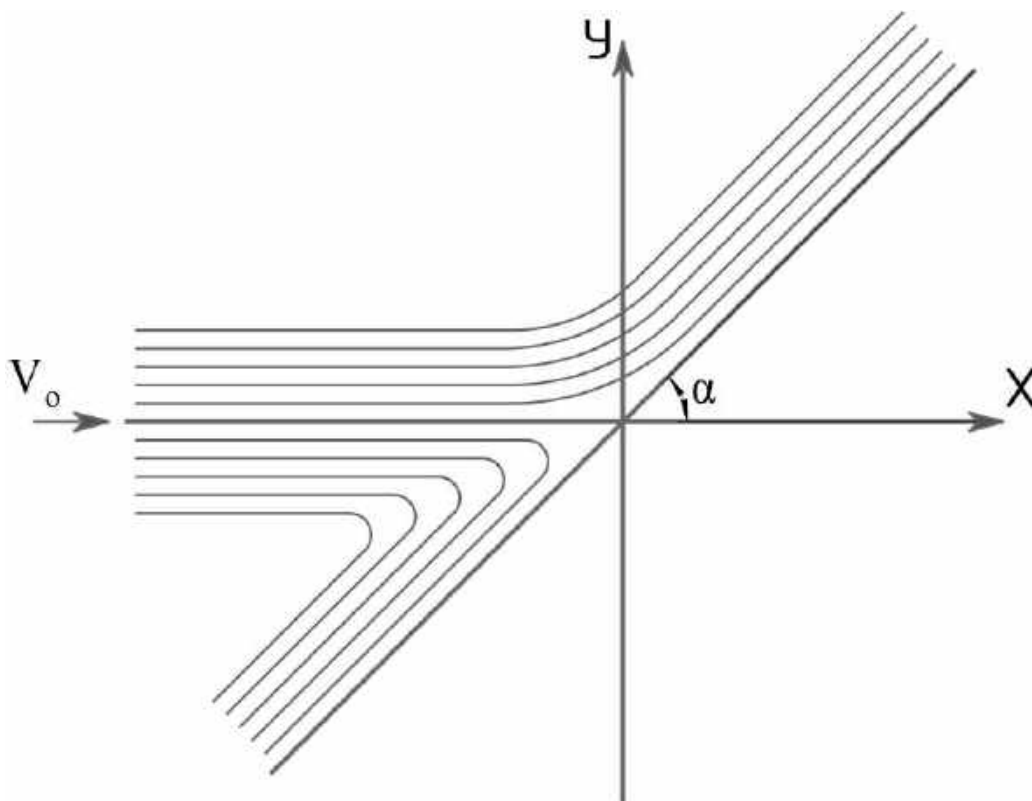


Рисунок 3.3 – Схема ліній течії при обтіканні пластини із горизонтальною складовою

Використовуючи методику викладену в роботі [102], отримаємо із системи (3.8) поле швидкостей в координатах Ейлера:

$$\begin{cases} V_{x33}(x, y) = V_0 [\omega(x, y)]^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{e^2 \cos \alpha (x \sin \alpha + y \cos \alpha) - (e^2 - 1)y}{\sqrt{e^2 - 1}} \right]; \\ V_{y33}(x, y) = -V_0 [\omega(x, y)]^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{e^2 \cos \alpha (x \sin \alpha - y \cos \alpha) - (e^2 - 1)y}{\sqrt{e^2 - 1}} \right]; \\ \omega(x, y) = \frac{e^2 \left[\sqrt{\cos^2 \alpha [x_0^2 (e^2 - 1) - [a(x, y)]^2 (1 - e^2 \sin^2 \alpha)] - x_0 \sin \alpha (e^2 - 1)} \right]^2}{(e^2 - 1)(e^2 \sin^2 \alpha - 1)^2} + [a(x, y)]^2; \\ a(x, y) = \sqrt{(x^2 + y^2)(e^2 - 1) - (y \cos \alpha + x \sin \alpha)^2 e^2}. \end{cases} \quad (3.9)$$

Обтікання пластини при вертикальній швидкості

Щоб отримати з рівнянь (3.1), що описують рух по гіперболі траєкторію 2-3, необхідно поміняти місцями $x(t)$ і $y(t)$ і змінити знак у виразах на протилежний, тоді ми отримаємо:

$$\begin{cases} x_{23}(t) = -(-a \sinh(\omega t + C) \sin \alpha_{23} + b_{23} \cosh(\omega t + C) \cos \alpha_{23}); \\ y_{23}(t) = -(a \sinh(\omega t + C) \cos \alpha_{23} + b_{23} \cosh(\omega t + C) \sin \alpha_{23}). \end{cases} \quad (3.10)$$

Дійсний кут $[\gamma] = \frac{\pi}{2} - \gamma$, а $[\alpha_{23}] = -\frac{[\gamma]}{2} = -\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2} = -\frac{\pi}{4} - \alpha$. Параметр

гіперболи $b_{23} = a \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) = a \frac{a-b}{a+b}$; Далі отримуємо:

$$\sin \alpha_{23} = -\frac{\sqrt{2}}{2}(\cos \alpha + \sin \alpha), \text{ а } \cos \alpha_{23} = -\frac{\sqrt{2}}{2}(\cos \alpha - \sin \alpha). \text{ Після підстановки}$$

система (3.10) матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} x_{23}(t) = -\frac{\sqrt{2}}{2}a \left[\sinh(\omega t + C)(\cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{a-b}{a+b} \cosh(\omega t + C)(\cos \alpha - \sin \alpha) \right]; \\ y_{23}(t) = -\frac{\sqrt{2}}{2}a \left[\sinh(\omega t + C)(\cos \alpha - \sin \alpha) - \frac{a-b}{a+b} \cosh(\omega t + C)(\cos \alpha + \sin \alpha) \right]. \end{cases} \quad (3.11)$$

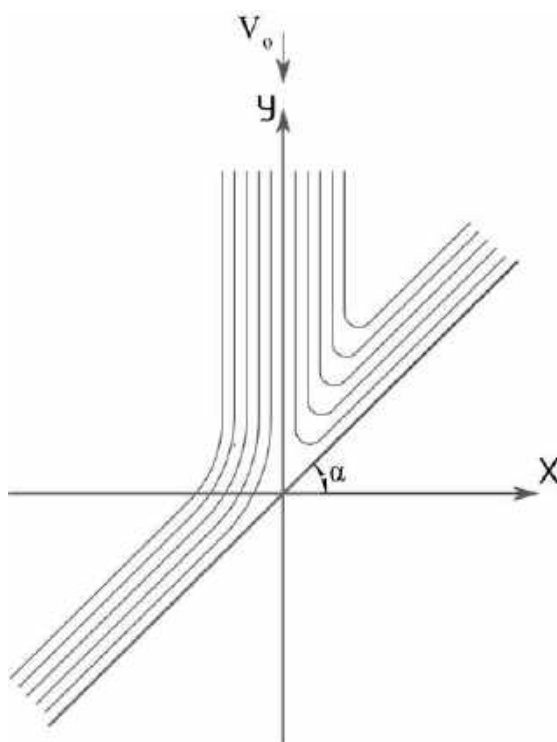


Рисунок 3.4 – Схема ліній течії при обтіканні пластини з вертикальною складовою

Швидкості матимуть вигляд:

$$\begin{cases} V_{x23}(t) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \omega \left[a \cosh(\omega t + C)(\cos \alpha + \sin \alpha) + a \frac{a-b}{a+b} \sinh(\omega t + C)(\cos \alpha - \sin \alpha) \right]; \\ V_{y23}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \omega \left[a \frac{a-b}{a+b} \sinh(\omega t + C)(\cos \alpha + \sin \alpha) - a \cosh(\omega t + C)(\cos \alpha - \sin \alpha) \right]. \end{cases} \quad (3.12)$$

Система (3.12) перетворюється на наступну:

$$\begin{cases} V_{x23}(x, y) = V_0[\omega(x, y)]^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{-(y \sin 2\alpha - x \cos 2\alpha)e^2 + 2y\sqrt{e^2 - 1}}{2 - e^2} \right]; \\ V_{y23}(x, y) = -V_0[\omega(x, y)]^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{-(x \sin 2\alpha + y \cos 2\alpha)e^2 - 2x\sqrt{e^2 - 1}}{2 - e^2} \right]; \\ \omega(x, y) = \frac{\left[(2 - e^2)y_0(\sin \alpha + \cos \alpha) - (1 + \sqrt{e^2 - 1})\zeta(x, y) \right]^2}{2(e^2 \sin 2\alpha - 2\sqrt{e^2 - 1})^2} \times \\ \times \frac{2e^2}{e^2 + 2\sqrt{e^2 - 1}} - [a(x, y)]^2 \frac{e^2 - 2\sqrt{e^2 - 1}}{e^2 + 2\sqrt{e^2 - 1}}; \\ a(x, y) = \frac{2\sqrt{e^2 - 1}(x^2 + y^2) - e^2[\sin 2\alpha(x^2 - y^2) + 2xy \cos 2\alpha]}{e^2 - 2\sqrt{e^2 - 1}}; \\ \zeta(x, y) = \sqrt{(1 - \sin 2\alpha) \left[y_0^2(e^2 + 2\sqrt{e^2 - 1}) \right] - [a(x, y)]^2(e^2 \sin 2\alpha - 2\sqrt{e^2 - 1})}. \end{cases} \quad (3.13)$$

де y_0 – координата, яка визначає початок пластичної течії.

Для опису траєкторії руху 1-1 скористаємося тією ж методикою $y(t)$ міняємо на $x(t)$ і змінюємо знак у $y(t)$ на протилежний [9]:

$$\begin{cases} x_{11}(t) = -a \sinh(\omega t + C) \sin \alpha_{11} + b_{11} \cosh(\omega t + C) \cos \alpha_{23}; \\ y_{11}(t) = -(a \sinh(\omega t + C) \cos \alpha_{11} + b_{11} \cosh(\omega t + C) \sin \alpha_{11}). \end{cases} \quad (3.14)$$

При цьому дійсний кут буде $[\gamma] = \lambda + \frac{\pi}{2}$, а

$$[\alpha_{11}] = -\frac{\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right)}{2} = -\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2} = -\frac{\pi}{4} + \alpha. \quad \text{Параметр гіперболи}$$

$$b_{11} = a \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2}\right) = a \frac{a+b}{a-b}, \quad \text{а} \quad \sin \alpha_{11} = \frac{\sqrt{2}}{2}(\sin \alpha - \cos \alpha),$$

$\cos \alpha_{11} = \frac{\sqrt{2}}{2}(\cos \alpha + \sin \alpha)$. Після підстановки, отримуємо:

$$\begin{cases} x_{11}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[a \sinh(\omega t + C)(\cos \alpha - \sin \alpha) + \frac{a+b}{a-b} \cosh(\omega t + C)(\cos \alpha + \sin \alpha) \right]; \\ y_{11}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[-a \sinh(\omega t + C)(\cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{a+b}{a-b} \cosh(\omega t + C)(\cos \alpha - \sin \alpha) \right]. \end{cases} \quad (3.15)$$

Швидкість матиме вигляд:

$$\begin{cases} V_{x11}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \omega \left[a \cosh(\omega t + C)(\cos \alpha - \sin \alpha) + a \frac{a+b}{a-b} \sinh(\omega t + C)(\cos \alpha + \sin \alpha) \right]; \\ V_{y11}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \omega \left[a \frac{a+b}{a-b} \sinh(\omega t + C)(\cos \alpha - \sin \alpha) - a \cosh(\omega t + C)(\cos \alpha + \sin \alpha) \right]. \end{cases} \quad (3.16)$$

Система (3.16) набуває вигляду:

$$\begin{cases} V_{x11}(x, y) = V_0[\omega(x, y)] \frac{1}{2} \left[\frac{-(y \sin 2\alpha - x \cos 2\alpha)e^2 + 2y\sqrt{e^2 - 1}}{2 - e^2} \right]; \\ V_{y11}(x, y) = -V_0[\omega(x, y)] \frac{1}{2} \left[\frac{-(y \cos 2\alpha + x \sin 2\alpha)e^2 - 2x\sqrt{e^2 - 1}}{2 - e^2} \right]; \\ \omega(x, y) = \frac{\left[\left(2\sqrt{e^2 - 1} - e^2 \right) y_0 (\sin \alpha + \cos \alpha) + \left(1 + \sqrt{e^2 - 1} \right) (\cos \alpha - \sin \alpha) \zeta(x, y) \right]^2}{2 \left(e^2 \sin 2\alpha - 2\sqrt{e^2 - 1} \right)^2} \times \\ \times \frac{2e^2}{e^2 + 2\sqrt{e^2 - 1}} + [a(x, y)]^2; \\ a(x, y) = \sqrt{\frac{-2\sqrt{e^2 - 1}(x^2 + y^2) + e^2 [\sin 2\alpha(x^2 - y^2) + 2xy \cos 2\alpha]}{e^2 - 2\sqrt{e^2 - 1}}}; \\ \zeta(x, y) = \sqrt{y_0^2 \left(e^2 - 2\sqrt{e^2 - 1} \right) - [a(x, y)]^2 \left(e^2 \sin 2\alpha - 2\sqrt{e^2 - 1} \right)}. \end{cases} \quad (3.17)$$

3.2 Кінематика процесу течії металу на ребрі матриці

Ребро матриці є частиною тора (рисунок 3.5), яку можна описати системою параметричних рівнянь [103, 104]:

$$\begin{cases} x(t, \varphi) = (R + r \cos(\omega t)) \cos(\omega t) \\ y(t, \varphi) = (R + r \cos(\omega t)) \sin(\omega t) , \\ z(t, \varphi) = \pm r \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3.18)$$

де r – радіус перетяжного ребра; R – відстань від осі обертання тора до осі твірної (рисунок 3.6); t – час деформації; ω – стала.

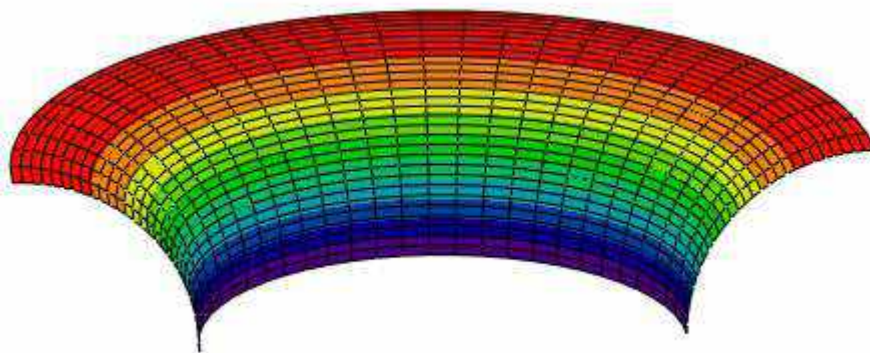


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд фрагмента тороїдної поверхні [99]

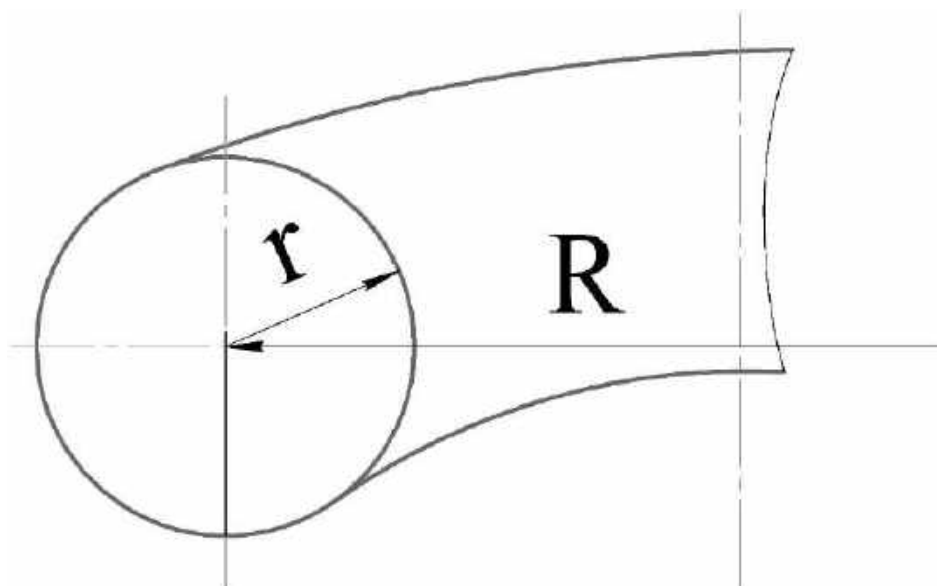


Рисунок 3.6 – Параметри тора

Система рівнянь (3.18) описує тороїдну поверхню в декартових координатах. Для пошуку складових швидкостей зручніше перейти до циліндричної системи

$$\rho = \sqrt{[x(t, \varphi)]^2 + [y(t, \varphi)]^2} = (R + r \cos(\omega t)). \quad (3.19)$$

Радіальна складова швидкості матиме вигляд

$$V_\rho = \frac{d\rho}{dt} = -\omega r \sin(\omega t). \quad (3.20)$$

З рівняння (3.19) видно, що

$$r \cos(\omega t) = \rho - R. \quad (3.21)$$

Для запису радіальної швидкості у зручнішому вигляді скористаємося наступною тотожністю

$$r^2 \sin^2(\omega t) + r^2 \cos^2(\omega t) = r^2.$$

Підставимо (3.21) у дану тотожність і, виконавши перетворення, отримаємо:

$$r^2 \sin^2(\omega t) = r^2 - (\rho - R)^2,$$

а отже

$$r \sin(\omega t) = \sqrt{r^2 - (\rho - R)^2}.$$

Таким чином, радіальна швидкість на перетяжному ребрі має вигляд

$$V_\rho = -\omega \sqrt{r^2 - (\rho - R)^2}. \quad (3.22)$$

Знаходимо параметр ω з початкових умов $V_\rho = -V_0$ при $\rho = R$. З урахуванням початкових умов та рівняння (3.22), отримуємо:

$$-V_0 = -\omega \sqrt{r^2 - (\rho - R)^2} = -\omega r,$$

а відповідно

$$\omega = \frac{V_0}{r}.$$

Підставимо отриманий вираз у рівняння (3.22), остаточно отримуємо радіальну швидкість

$$V_\rho = -\frac{V_0}{r} \sqrt{r^2 - (\rho - R)^2}. \quad (3.23)$$

Знайдемо другу складову швидкості V_z .

З системи рівнянь, що описують форму перетяжного ребра, відомо, що $z(t, \varphi) = r \sin(\omega t)$. Визначимо швидкість V_z

$$V_z = \frac{dz}{dt} = -\omega r \cos(\omega t). \quad (3.24)$$

Для запису швидкості V_z у зручнішому вигляді скористаємося наступною

тотожністю:

$$r^2 \sin^2(\omega t) + r^2 \cos^2(\omega t) = r^2,$$

а оскільки $z = r \sin(\omega t)$, перепишемо цю тотожність як

$$z^2 + r^2 \cos^2(\omega t) = r^2.$$

Виконавши перетворення, отримаємо

$$r \cos(\omega t) = \sqrt{r^2 - z^2}.$$

Підставимо отриманий вираз і значення ω в (3.24), отримуємо:

$$V_z = -\frac{V_0}{r} \sqrt{r^2 - z^2}. \quad (3.25)$$

Для визначення третьої складової швидкості V_ψ скористаємось рівнянням нерозривності в циліндричних координатах

$$\frac{\partial V_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial V_\psi}{\partial \psi} + \frac{V_\rho}{\rho} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0; \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial V_\psi}{\partial \psi} = -\rho \left(\frac{\partial V_\rho}{\partial \rho} + \frac{V_\rho}{\rho} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right);$$

$$\partial V_\psi = -\rho \left(\frac{\partial V_\rho}{\partial \rho} + \frac{V_\rho}{\rho} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \partial \psi;$$

$$V_\psi = -\int \left(\frac{\partial V_\rho}{\partial \rho} + \frac{V_\rho}{\rho} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \rho \partial \psi. \quad (3.27)$$

Використовуючи вираз (3.23), знаходимо

$$\frac{V_\rho}{\rho} = -\frac{V_0 \sqrt{r^2 - (\rho - R)^2}}{\rho r},$$

$$\frac{\partial V_\rho}{\partial \rho} = -\frac{V_0 (2R - 2\rho)}{2r \sqrt{r^2 - (\rho - R)^2}},$$

а з урахуванням рівняння (3.25)

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} = \frac{V_0 z}{r \sqrt{r^2 - z^2}}.$$

Підставимо всі складові до рівняння (3.27). Виконавши перетворення,

отримаємо

$$V_{\psi} = \left[\frac{V_0 [r^2 - (R - \rho)(R - 2\rho)]}{r\sqrt{r^2 - (R - \rho)^2}} - \frac{V_0 z \rho}{r\sqrt{r^2 - z^2}} \right] \psi. \quad (3.28)$$

Таким чином отримуємо систему рівнянь, що описують поле швидкостей переміщень металу на ребрі матриці, а отже поле швидкостей течії металу при деформації має такий вигляд

$$\begin{aligned} V_{\rho} &= -\frac{V_0}{r} \sqrt{r^2 - (\rho - R)^2} \\ V_z &= -\frac{V_0}{r} \sqrt{r^2 - z^2} \\ V_{\psi} &= \left[\frac{V_0 [r^2 - (R - \rho)(R - 2\rho)]}{r\sqrt{r^2 - (R - \rho)^2}} - \frac{V_0 z \rho}{r\sqrt{r^2 - z^2}} \right] \psi \end{aligned} \quad (3.29)$$

Систему (3.29) отримано з урахуванням початкових умов $V_{\rho} = -V_0$ при $\rho = R$ тоді $V_z = -V_0$ при $z = 0$. Швидкість V_0 слід вважати як швидкість течії металу в точці, де фланець переходить у тороїдну поверхню, яка суміжна ребру матриці. Як видно, радіальна V_{ρ} і вертикальна V_z складові швидкості залежать лише від однієї координати, а поперечна V_{ψ} – від усіх трьох. Від’ємне значення радіальної складової швидкості свідчить про рух металу до центру.

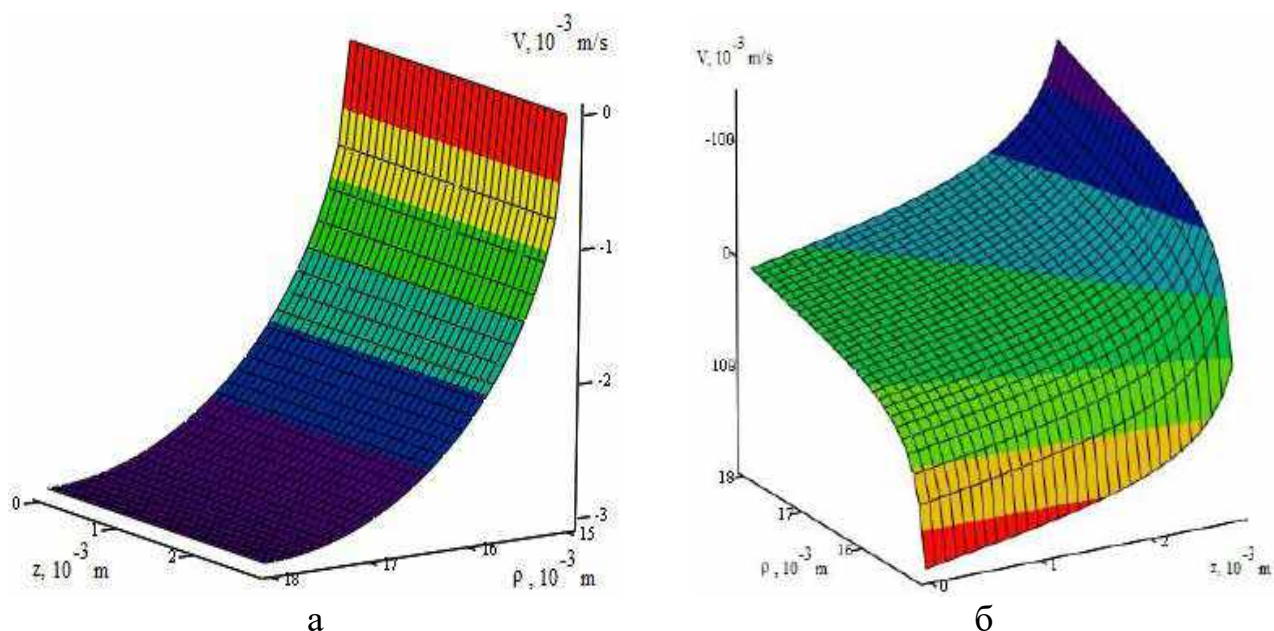
Оскільки складові швидкості в системі (3.29) паралельні до осей циліндричної системи і взаємно перпендикулярні, модуль швидкості можна розрахувати за відомою формулою:

$$V = \sqrt{V_{\rho}(\rho)^2 + V_{\psi}(\rho, \psi, z)^2 + V_z(z)^2}. \quad (3.30)$$

Поля швидкостей і деформацій, а також їх інтенсивності легко розраховуються за допомогою системи (3.29) за описаною вище методикою. Таким чином, будується цілісна картина пластичної течії металу на ребрі матриці, що в кінцевому підсумку дозволяє розрахувати роботу деформації.

Побудуємо графіки залежностей радіальної (рисунок 3.7, а) і трансверсальної (рисунок 3.7, б) складових швидкості від координат при вихідних даних $r = 3$ мм, $R = 18$ мм і $V = 3$ мм/с. Ці вихідні дані відповідають

діаметру робочої частини матриці 30 мм і радіус ребра матриці 3 мм.



а – радіальна складова ($\psi = 0$); б – трансверсальна складова ($\psi = \pi$)

Рисунок 3.7 – Швидкості течії металу на перетяжному ребрі матриці

Як бачимо з рисунка 3.7, вигляд наведених залежностей добре узгоджується з фізичною моделлю процесу оброблення, а також з реальною картиною течії матеріалу, що спостерігається експериментально.

3.3 Швидкості деформацій

Швидкість деформації при штампуванні-витягуванні є важливим параметром, який використовується для характеристики пластичної течії [103-106]. Поле швидкостей переміщень матеріальних частинок дає змогу визначити швидкості деформацій, які в нашому випадку набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\rho\rho} &= \frac{\partial V_\rho}{\partial \rho}; \varepsilon_{\psi\psi} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial V_\psi}{\partial \psi} + \frac{V_\rho}{\rho}; \varepsilon_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z}; \varepsilon_{\psi z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial V_z}{\partial \psi} + \frac{\partial V_\psi}{\partial z}; \\ \varepsilon_{\rho\psi} &= \frac{\partial V_\psi}{\partial \rho} - \frac{V_\psi}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial V_\rho}{\partial \psi}; \varepsilon_{\rho z} = \frac{\partial V_\rho}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial \rho} = 0. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Використовуючи рівняння (3.29) та здійснивши дії, зазначені у співвідношеннях (3.30), отримаємо вирази для швидкостей деформацій:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{\rho\rho} &= -\frac{V_0(2R-2\rho)}{2r\sqrt{r^2-(R-\rho)^2}}; \\
\varepsilon_{\psi\psi} &= -\frac{\frac{V_0[(R-\rho)(R-2\rho)-r^2]}{r\sqrt{r^2-(R-\rho)^2}} + \frac{V_0\rho z}{r\sqrt{r^2-z^2}}}{\rho} - \frac{V_0\sqrt{r^2-(R-\rho)^2}}{\rho r}; \\
\varepsilon_{zz} &= \frac{V_0 z}{r\sqrt{r^2-z^2}}; \\
\varepsilon_{\psi z} &= -\psi \left[\frac{V_0\rho}{r\sqrt{r^2-z^2}} + \frac{V_0\rho z^2}{r(r^2-z^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \\
\varepsilon_{\rho\psi} &= \psi \left[\frac{V_0(3R-4\rho)}{r\sqrt{r^2-(R-\rho)^2}} - \frac{V_0 z}{r\sqrt{r^2-z^2}} + \frac{V_0(2R-2\rho)[(R-\rho)(R-2\rho)-r^2]}{2r[r^2-(R-\rho)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] + \\
&+ \frac{\psi \left[\frac{V_0[(R-\rho)(R-2\rho)-r^2]}{r\sqrt{r^2-(R-\rho)^2}} + \frac{V_0\rho z}{r\sqrt{r^2-z^2}} \right]}{\rho}.
\end{aligned}$$

Для наочності побудуємо просторову картину розподілу швидкостей деформацій при $\psi = \pi$ та інтенсивності швидкості деформацій $\psi = 0$. Такій підхід дозволить дослідити зміну усіх складових, та оцінити найменші значення інтенсивності швидкості деформацій, яку дуже зручно аналізувати разом з інтенсивностями деформацій та напружень. Як видно з рисунків, кожна складова швидкості деформації на різних ділянках перетяжного ребра впливає на процес витягування по-своєму.

Модуль радіальної складової швидкості деформації $\varepsilon_{\rho\rho}$ (рисунок 3.8) постійний за своїм значенням вздовж осі Z і збільшується в міру переходу фланцевої частини деталі в циліндр по перетяжному ребру в напрямку осі обертання деталі, що витягується. Негативне значення цієї складової швидкості деформації не констатує деформацій, що стискають, а є наслідком того, що вектор радіальної складової швидкості спрямований до центру і має негативне

значення, яке транслює на складову швидкостей деформацій. Таким чином, метал на фланці відчуває деформації, що розтягують.

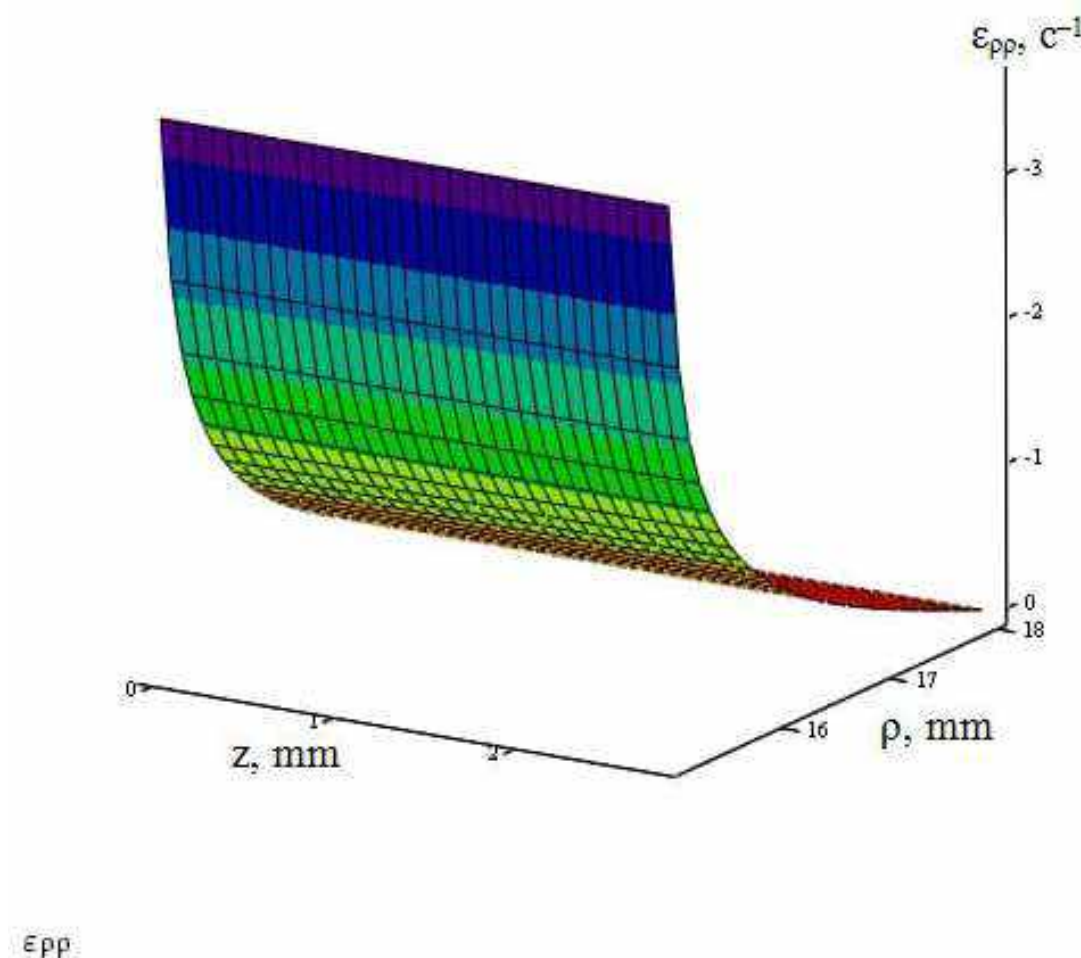


Рисунок 3.8 – Радіальна складова швидкості деформації $\epsilon_{\rho\rho}$

Вертикальна складова ϵ_{zz} (рисунок 3.9), у свою чергу, постійна за своїм значенням в радіальному напрямку і зменшується в міру поглиблення деталі, що витягується, по перетяжному ребру, що переходить в циліндричну порожнину матриці.

Окружна складова $\epsilon_{\varphi\varphi}$ (рисунок 3.10), в порівнянні з іншими складовими, впливає на всіх етапах переходу фланця в циліндр, при цьому в процесі деформування заготовки змінюється величина і напрямок складової швидкості деформації. Це, можливо, є однією з причин втрати стійкості та виникненням гофр на фланці заготовки, інтенсивність утворення яких згасає з наближенням до діаметра витягування. Остання обставина, у свою чергу, може сприяти зростанню зусилля витягування.

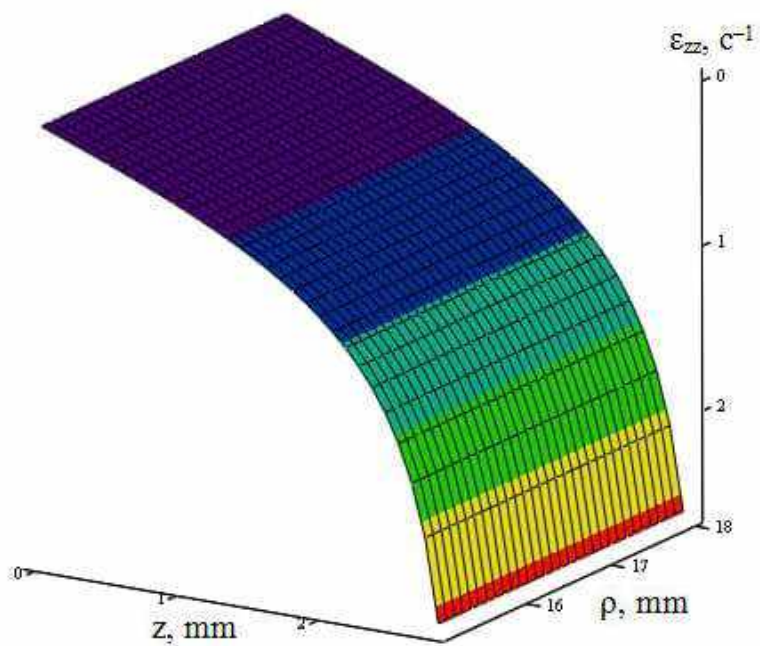

 ϵ_{zz}

Рисунок 3.9 – Вертикальна складова швидкості деформації ϵ_{zz}

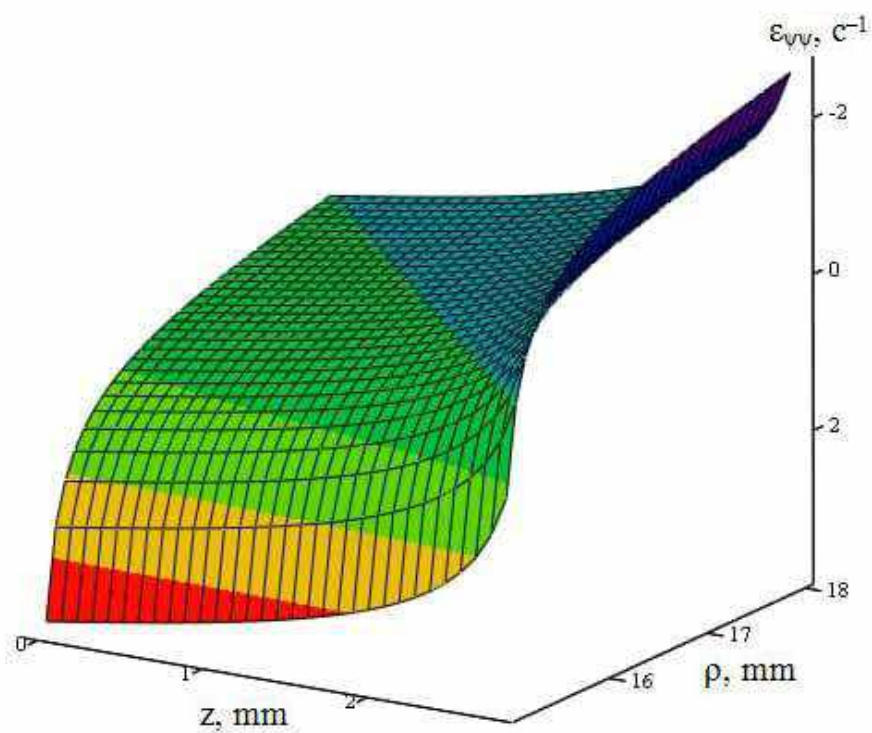

 $\epsilon_{\psi\psi}$

Рисунок 3.10 – Окружна складова швидкості деформації $\epsilon_{\psi\psi}$

Складова $\varepsilon_{\psi z}$ (рисунок 3.11) на початковому етапі процесу витягування має максимальні абсолютні значення, які починають різко падати ближче до завершення переходу фланцевої частини в циліндр по висоті перетяжного ребра, аж до нуля. У циліндричній частині заготівлі складова $\varepsilon_{\psi z}$ не впливає на інтегральну картину інтенсивності швидкостей деформацій.

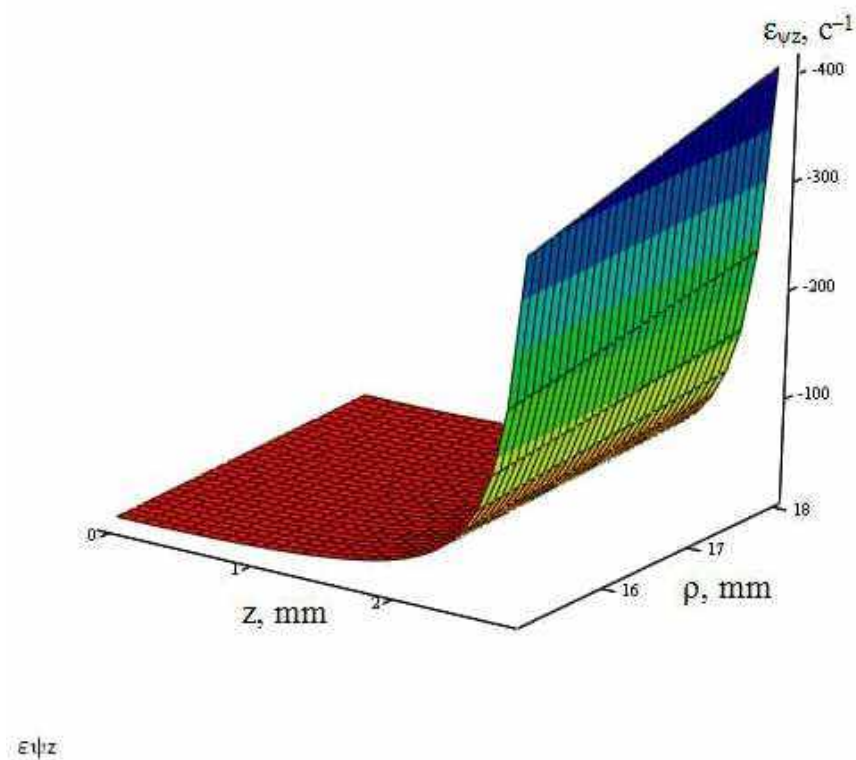


Рисунок 3.11 – Складова швидкості деформації $\varepsilon_{\psi z}$

Протилежним чином поводить ся складова $\varepsilon_{\rho\psi}$ (рисунок 3.12), її дія проявляється на завершальному етапі переходу фланця в циліндр в радіальному напрямку до осі і не залежить від координати Z , а абсолютне значення досягає апогейного в циліндричній частині деталі, що витягується.

Виходячи з рисунка, який показує картину розподілу інтенсивності швидкостей деформацій, видно, що описані вище впливи різних складових швидкості деформацій загалом досягають пікових значень на перетяжному ребрі, а саме в місці початку формування циліндричної оболонки деталі. Дійсно, ближче до ділянки переходу перетяжного ребра в циліндр, значення інтенсивності швидкостей деформацій різко зростає, що відповідає фізичним уявленням розвиненим в роботі та результатам експериментальних досліджень.

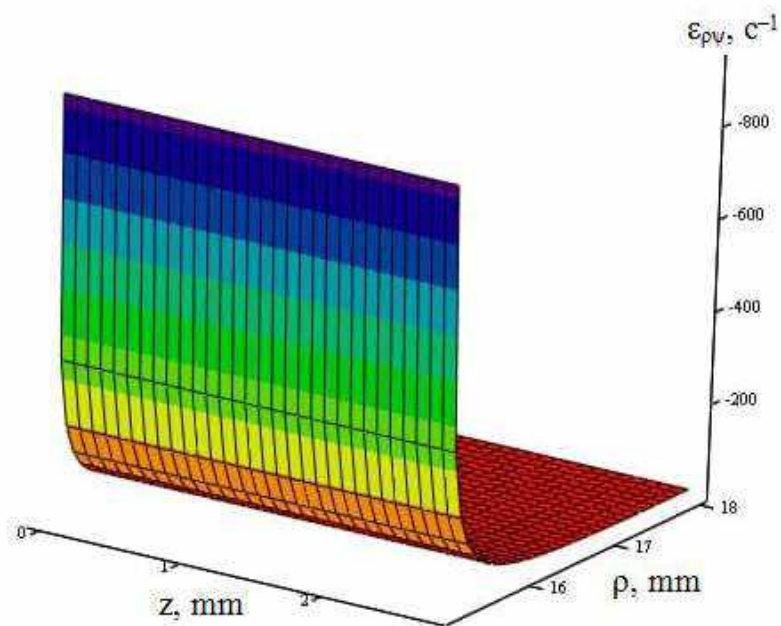

 $\epsilon_{r\psi}$

Рисунок 3.12 – Складова швидкості деформації $\epsilon_{r\psi}$

Можна відзначити, що найбільші значення інтенсивності швидкості деформацій спостерігаються в зоні зміни напружено-деформованого стану. (рисунок 3.13).

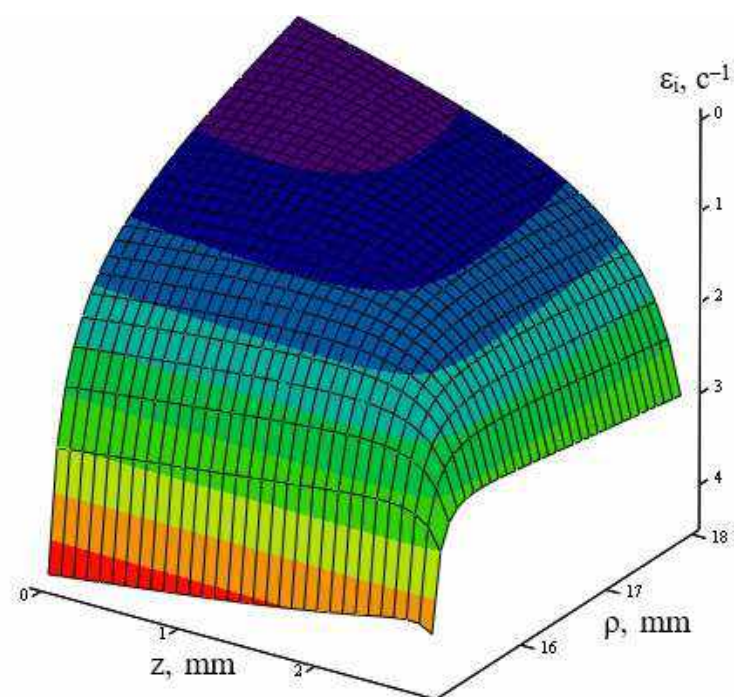


Рисунок 3.13 – Розподіл інтенсивності швидкостей деформації ($\psi = 0$)

Інтенсивність швидкостей деформацій можна обчислити за формулами:

$$\begin{aligned}
 e_{\rho\rho} &= -\frac{V_0(2R-2\rho)}{2r\sqrt{r^2-(R-\rho)^2}}t; \\
 e_{\psi\psi} &= \left(-\frac{\frac{V_0[(R-\rho)(R-2\rho)-r^2]}{r\sqrt{r^2-(R-\rho)^2}} + \frac{V_0\rho z}{r\sqrt{r^2-z^2}}}{\rho} - \frac{V_0\sqrt{r^2-(R-\rho)^2}}{\rho r} \right)t; \\
 e_{zz} &= \frac{V_0 z}{r\sqrt{r^2-z^2}}t; \\
 e_{\psi z} &= -\psi \left[\frac{V_0\rho}{r\sqrt{r^2-z^2}} + \frac{V_0\rho z^2}{r(r^2-z^2)^{\frac{3}{2}}} \right]t; \\
 e_{\rho\psi} &= \psi t \left[\frac{V_0(3R-4\rho)}{r\sqrt{r^2-(R-\rho)^2}} - \frac{V_0 z}{r\sqrt{r^2-z^2}} + \frac{V_0(2R-2\rho)[(R-\rho)(R-2\rho)-r^2]}{2r[r^2-(R-\rho)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] + \\
 &+ \frac{\psi \left[\frac{V_0[(R-\rho)(R-2\rho)-r^2]}{r\sqrt{r^2-(R-\rho)^2}} + \frac{V_0\rho z}{r\sqrt{r^2-z^2}} \right]}{\rho}t.
 \end{aligned}$$

Фактично, визначення розподілу напружень, які є функцією координат і часу [107], є однією з основних цілей для розгляду операцій листового штампування [108]. Таким чином, математичні моделі [109, 110] необхідні для прогнозування робочого зусилля різних видів штампування. Тому для енергосилових характеристик важливо отримати моделі для розрахунку інтенсивності напружень. Інтенсивність напружень розраховували за формулою:

$$\sigma_i = m\sigma_t e_i^n, \quad (3.32)$$

де n – індекс деформаційного зміцнення; m – коефіцієнт, що враховує змінення границі текучості матеріалу ($m\sigma_t$ – напруження течії при логарифмічній деформації $e_i = 1$); σ_t – границя текучості, МПа.

3.4 Визначення роботи деформування

3.4.1 Коефіцієнт жорсткості

Умова збігу напрямного тензора напружень з напрямним тензором швидкостей деформацій дозволяє ввести автору роботи [16] універсальну характеристику – коефіцієнт жорсткості:

$$\mu = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i}. \quad (3.33)$$

Після введення коефіцієнта жорсткості рівняння зв'язку між девіатором напружень і девіатором швидкостей деформацій набуває вигляду:

$$D_\sigma = 2\mu D_\varepsilon. \quad (3.34)$$

Це рівняння дозволяє записати систему рівнянь зв'язку між складовими напружень та складовими швидкостей деформацій:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \sigma + 2\mu\varepsilon_{11}, & \tau_{12} &= \mu\varepsilon_{12}, \\ \sigma_{22} &= \sigma + 2\mu\varepsilon_{22}, & \tau_{23} &= \mu\varepsilon_{23}, \\ \sigma_{33} &= \sigma + 2\mu\varepsilon_{33}, & \tau_{31} &= \mu\varepsilon_{31}. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Введений таким чином коефіцієнт μ є універсальною характеристикою і враховує механічні властивості середовища, що деформується, а також особливості, властиві досліджуваному технологічному процесу. Для середовищ, що деформуються, коефіцієнт жорсткості може приймати широкий інтервал значень. Так, для ідеальних рідин він дорівнює нулю, а абсолютно твердого тіла – нескінченності. Для реальних тіл, що деформуються, коефіцієнт жорсткості лежить у зазначеному інтервалі значень:

$$0 < \mu < \infty.$$

У випадку коефіцієнт жорсткості є складною характеристикою, на яку впливають різні чинники. Інтенсивність напружень, що входить в рівняння (3.33), для різних середовищ, що деформуються, знаходиться в складній функціональній залежності від інтенсивності деформацій, інтенсивності швидкостей деформацій та інших параметрів:

$$\sigma_i = \Phi(e_i, \varepsilon_i, T, t). \quad (3.36)$$

Зупинимося на залежності (3.36) простішого вигляду. Припустимо, що інтенсивність напружень є функція лише інтенсивності деформацій:

$$\sigma_i = \Phi(e_i). \quad (3.37)$$

Як найпростішу функціональну залежність розглянемо залежність статичного вигляду:

$$\sigma_i = B e_i^n. \quad (3.38)$$

Коефіцієнт жорсткості у цьому випадку визначається рівнянням

$$\mu = \frac{B e_i^n}{3 \varepsilon_i}. \quad (3.39)$$

Припустимо, що $n=0$, тоді інтенсивність напружень є постійною величиною. Припустимо, що $B = \sigma_s$, тоді інтенсивність напружень дорівнює межі плинності:

$$\sigma_i = \sigma_s.$$

Коефіцієнт жорсткості для цього випадку має вигляд

$$\mu = \frac{\sigma_s}{3 \varepsilon_i}. \quad (3.40)$$

Тіло, що деформується, у якого інтенсивність напружень постійна і дорівнює межі плинності, називається ідеально пластичним. До цієї групи тіл можна віднести метали, що деформуються за високої температури. Для ідеально пластичного металу коефіцієнт жорсткості залежить від інтенсивності деформацій. У діапазоні значень:

$$0 < n < 1 \quad (3.41)$$

лежить група тіл, що зміцнюються у процесі пластичної деформації. Інтенсивність напружень у них нелінійно пов'язана з інтенсивністю деформацій відповідно до рівняння (3.33).

Коефіцієнт жорсткості цих тіл визначається за рівнянням

$$\mu = \frac{B e_i^n}{3 \varepsilon_i}. \quad (3.42)$$

До цієї групи тіл, що деформуються, можна включити метали, що деформуються в холодному стані і здатні до зміцнення у процесі пластичної деформації. При $n = 1$ інтенсивність напружень визначається рівнянням

$$\sigma_i = B e_i,$$

де

$$B = \frac{3E_0}{2(1+\nu)}. \quad (3.43)$$

Коефіцієнт жорсткості визначається виразом у цьому випадку:

$$\mu = \frac{E_0}{2(1+\nu)} \frac{e_i}{\varepsilon_i}. \quad (3.44)$$

Всі зазначені вище особливості належать до постійної швидкості деформації. Якщо швидкість деформації змінна, то коефіцієнт жорсткості за постійної інтенсивності деформацій знижується зі зростанням інтенсивності швидкостей деформації за гіперболічним законом.

3.4.2. Види кривих зміцнення

Згідно з [111] існує вісім видів кривих зміцнення, побудованих за результатами випробування на стиснення. Характер кривих зміцнення $\sigma_s(\varepsilon_1)$ обумовлений головним чином фізико-механічними властивостями металів та сплавів, а також видом та режимом попередньої термічної та пластичної обробки.

Різні типи кривих зміцнення наведені на рисунку 3.14 [112]. Крива (рисунок 3.14, а) найбільш поширена та описує зміцнення широкого спектру матеріалів, таких як залізо, алюміній та його сплави, мідь і титан, більшість високолегованих сплавів, легкі та важкодеформовані метали та сплави, леговані конструкційні інструментальні сталі, термічно оброблені та гарячекатані сталі. Ці криві зміцнення відрізняє початковий порівняно великий градієнт зростання напружень течії матеріалу, з наступним пологим зменшенням інтенсивності зміцнення аж до інваріантності до зростання деформації. У цьому випадку

пластичні від міцних металів та сплавів відрізняє лише менша інтенсивність збільшення σ_s зі зростанням ε_1 .

Для сталей аустенітного класу деяких титанових і мідних сплавів характерний вид кривих, наведений на рисунку 3.14, б. Такий вид відрізняється більшою інтенсивністю зміцнення, що зменшується при великих ступенях деформації.

Для цирконію та деяких сплавів на його основі характерна залежність $\sigma_s(\varepsilon_1)$, показана на рисунку 3.14, в. Ці матеріали при незначних ступенях деформації виявляють малу інтенсивність зміцнення, яка значно зростає при подальшому збільшенні ступеня деформації з подальшим зниженням градієнта зростання зміцнення при деформаціях близьких до руйнування матеріалу.

Подані на рисунку 3.14, г криві зміцнення відрізняються досягненням апогейного значення σ_s , яке зменшується або залишається постійним при подальшому збільшенні ε_1 . Цей тип є прийнятним для опису зміцнення цинку та його сплавів та алюмінію у відпаленому стані (крива 2).

Для алюмінієвих сплавів при високих ступенях деформації, а також у загартованому та відпаленому стані характерна крива 2 (рисунок 3.14, г).

На рисунку 3.14, е наведені криві зміцнення пластичних сплавів попередньо оброблених тиском у холодному стані при порівняно невеликих деформаціях (приблизно 0,1...0,15). Слід зазначити, що характер попереднього навантаження відмінний від подальшого деформування (наприклад, волочіння + осадження). Неважко помітити, що попередній ступінь деформації надає зворотно пропорційний вплив на інтенсивність змінення σ_s (крива 3 порівняно з кривою 1). Криві зміцнення таких попередньо деформованих матеріалів відрізняє те, що градієнт зростання σ_s зі збільшенням ε_1 у всьому діапазоні ступенів деформації менше, ніж у кривих зміцнення перших трьох видів (рисунки 3.14, а, б, в).

Криві зміцнення пластичних сплавів, попередньо оброблених тиском у холодному стані з протилежно спрямованими навантаженнями у попередньому

та подальшому деформуванні, показані на рисунку 3.14, ж. Ці криві характерні для пластичних сталей з великими ступенями попередньої деформації (більше 0,1...0,15), сталей середньої та високої міцності, латуням та бронзам з високими ступенями попередньої деформації.

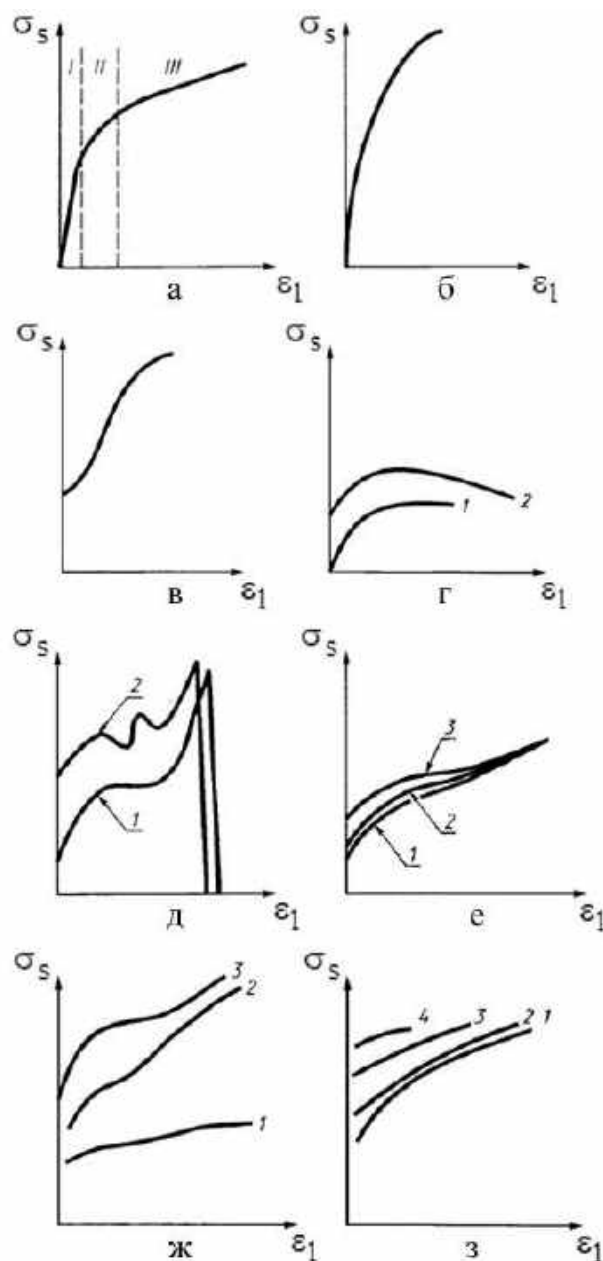


Рисунок 3.14 – Типи кривих зміцнення

Останній вид кривих (рисунок 3.14, і) відповідає залізовуглецевим сплавам попередньо деформованим в холодному стані, з подальшим додаванням навантаження збігається у напрямку з попередньою деформацією. По нахилу кривих можна судити про величину попередньої деформації, наприклад, пологий

нахил кривих зміцнення (криві 3 і 4) відповідає вищим ступеням попередньої деформації. Для таких матеріалів характерний невисокий градієнт збільшення.

Криві зміцнення першого виду добре апроксимуються залежністю

$$\sigma_s = \sigma_{s1} \varepsilon_1^n \quad (3.45)$$

Криві зміцнення другого та третього виду описуються виразом (3.45) з деяким наближенням. Цю залежність можна використовувати для опису кривої зміцнення четвертого виду в діапазоні ступенів деформації до появи максимального значення на ній.

Достатньо точно для практичних цілей криві зміцнення шостого, сьомого та восьмого вигляду можна з деяким наближенням описати лінійною залежністю

$$\sigma_s = \sigma'_{s0} + b' \varepsilon_1,$$

де σ'_{s0} – екстраполірована межа плинності попередньо деформованих сталей (відрізок, що відсікається лінеаризованою прямою на осі ординат); b' – коефіцієнт, що характеризує нахил лінеаризованих кривих зміцнення.

3.4.3 Робота деформування на перетяжному ребрі

Відповідно до раніше прийнятої методики, детально освітленої в [73], робота деформування може визначитися за наступною залежністю

$$A = \int_t \iiint_V E_i dV dt, \quad (3.46)$$

де E_i – функція дисипації енергії, яка визначається наступним виразом

$$E_i = \sigma_i \varepsilon_i. \quad (3.47)$$

Визначимо за формулою (3.47) функцію дисипації енергії ділянок, показаних на рисунку 3.15:

1-а ділянка – фланець

$$E_\phi = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{R_3 - R_o}{t_k} \frac{R_3}{r^2} \left(1 - \frac{t}{t_k} \right) \left[\sigma_o + \frac{2\Pi}{\sqrt{3}} \frac{R_3 - R_o}{t_k} \frac{R_3}{r^2} t - \frac{t^2}{t_k} \right]; \quad (3.48)$$

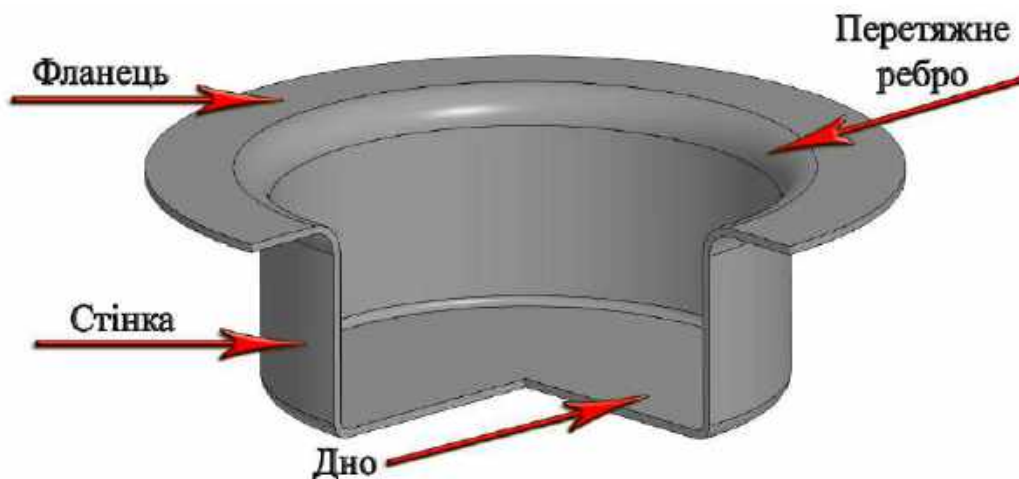


Рисунок 3.15 – Розподіл деталі на ділянки

2-а ділянка – стінка циліндричної оболонки

$$E_{ст} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{t_k} \sqrt{(l_k - l_o)^2 + \frac{1}{4} \left(l_k \sin \frac{\pi - \alpha}{2} \right)^2} \frac{1}{l_o + \frac{l_k - l_o}{t_k} t} \times$$

$$\times \left[\sigma_o + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\Pi}{l_k - l_o} \ln \frac{l_o + \frac{l_k - l_o}{t_k} t}{l_o} \sqrt{(l_k - l_o)^2 + \frac{1}{4} \left(l_k \sin \frac{\pi - \alpha}{2} \right)^2} \right]; \quad (3.49)$$

3-я ділянка – дно

$$E_{дн} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_o}{\sigma_o - V_o t} \left[\sigma_o + \frac{2}{\sqrt{3}} \Pi \ln \frac{\sigma_o}{\sigma_o - V_o t} \right]. \quad (3.50)$$

Отримавши вирази визначення функції дисипації енергії для обраних раніше ділянок, визначимо питому роботу пластичної деформації одиниці обсягу цих ділянок. Виконуючи інтегрування виразів (3.17), (3.18), (3.19) за часом і підставивши межі інтегрування: верхній – t_k , нижній – 0, отримаємо

$$a_{фл} = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} (R_o - R_3) \frac{R_3}{r^2} + \frac{\Pi}{6} (R_3 - R_o)^2 \frac{R_3}{r^4}; \quad (3.51)$$

$$a_{ст} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_o}{l_k - l_o} \ln \frac{l_k}{l_o} \sqrt{(l_n - l_o)^2 + \frac{1}{4} \left(l_n \sin \frac{\pi - \alpha}{2} \right)^2} +$$

$$+ \frac{2\Pi}{3} \left[1 + \frac{1}{4} \left(l_k \sin \frac{\pi - \alpha}{2} \right)^2 \right] (\ln^2 l_k - \ln^2 l_o); \quad (3.52)$$

$$a_{\text{дн}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_o \ln \frac{\sigma_o}{\delta_k} + \frac{4}{3} \Pi \ln^2 \frac{\delta_k}{\delta_o}. \quad (3.53)$$

Маючи вираз визначення питомої роботи пластичної деформації одиниці виділених ділянок, можна визначити повну роботу деформації цих ділянок.

Для визначення роботи пластичної деформації фланця необхідно проінтегрувати вираз (3.51) за обсягом з підстановкою відповідних меж згідно з виразом

$$A_{\text{фл}} = \int_{R_o}^{R_3} \int_0^{2\pi} \int_0^{\delta} a_{\text{фл}} dz r dr d\varphi. \quad (3.54)$$

Після інтегрування та нескладних перетворень, отримуємо

$$A_{\text{фл}} = \pi \delta (R_3 - R_o) \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_o R_3 \ln \frac{R_3}{R_o} + \frac{\Pi (R_3 - R_o)^2}{6 R_o} (R_3 - R_o) \right]. \quad (3.55)$$

Аналогічно знаходимо роботу деформування стінки циліндричної оболонки:

$$A_{\text{ст}} = \int_0^x \int_0^{2\pi R} \int_0^1 a_{\text{ст}} dx dy dz, \quad (3.56)$$

де R – радіус циліндричної поверхні, що визначається з простого геометричного співвідношення (рисунок 3.16)

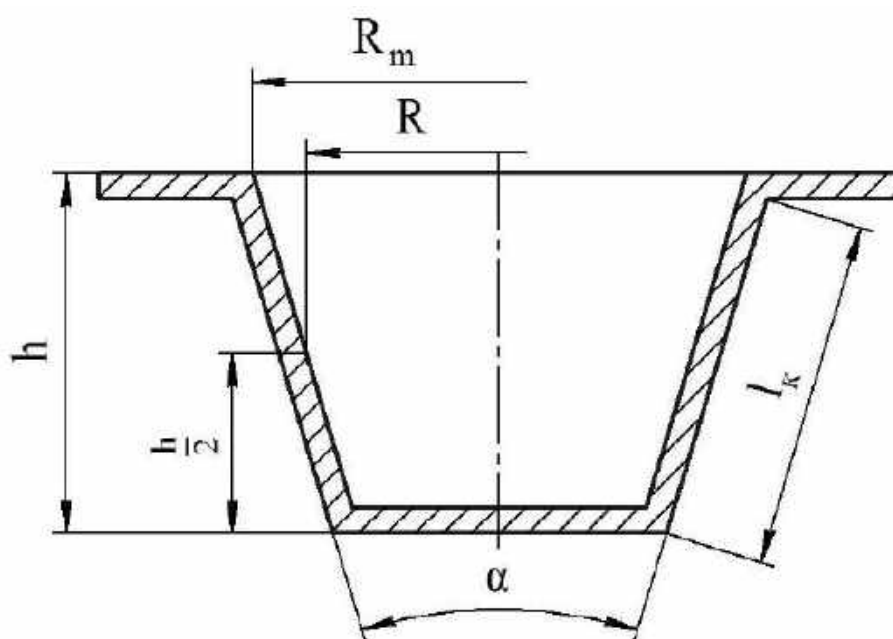


Рисунок 3.16 – Характерні розміри деталі

$$R = R_m - \frac{h}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (3.57)$$

де h – глибина проштампування, м;

R_m – радіус циліндричної поверхні біля протяжного ребра, м.

При інтегруванні по x верхню границю необхідно брати згідно з виразом (3.54) для кінцевого моменту часу, тоді після нескладних перетворень остаточно отримаємо вираз для визначення роботи формоутворення стінки циліндричної оболонки:

$$A_{\text{ст}} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_o l_o}{l_k - l_o} \left(R_m - \frac{h}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \sqrt{(l_k - l_o)^2 + \frac{1}{4} \left(\sin \frac{\pi - \alpha}{2} \right)^2} \times \\ \times \left[\sigma_o \ln \frac{l_k}{l_o} + \frac{\Pi}{3} \frac{(\ln^2 l_k - \ln^2 l_o)}{l_k - l_o} \sqrt{(l_k - l_o)^2 + \frac{1}{4} \left(l_k \sin \frac{\pi - \alpha}{2} \right)^2} \right]. \quad (3.55)$$

Роботу деформування дна оболонки можна визначити або інтегруванням (3.53) за обсягом, або просто множенням на об'єм, що деформується (останнє справедливо, оскільки розподіл деформацій по дну вважаємо рівномірним):

$$A_{\text{дн}} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} R_{\text{дн}} \delta \left(\sigma_o \ln \frac{\delta_o}{\delta_k} + \frac{2}{\sqrt{3}} \Pi \ln^2 \frac{\delta_k}{\delta_o} \right). \quad (3.56)$$

Повна робота пластичної деформації при формоутворенні оболонки визначатиметься як сума робіт, знайдених за рівняннями (3.54), (3.55) та (3.56).

$$A = A_{\text{фл}} + A_{\text{ст}} + A_{\text{дн}}. \quad (3.57)$$

Введемо у вираз (3.57) ще одну складову – роботу пластичної деформації металу на перетяжному ребрі (рисунок 3.17):

$$A_T = \int_t^R \int_{R - \sqrt{r_2^2 - z^2}}^R m \sigma_t e_i^n \varepsilon_i \rho d\rho \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_2} dz dt - \\ - \int_t^R \int_{R - \sqrt{r_1^2 - z^2}}^R m \sigma_t e_i^n \varepsilon_i \rho d\rho \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_1} dz dt. \quad (3.58)$$

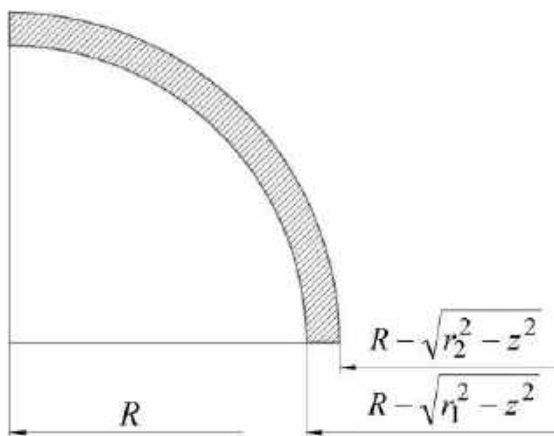


Рисунок 3.17 – Розрахункова схема визначення роботи деформування

Додамо складову (3.58) у вираз (3.56), остаточно отримаємо

$$A_{\Sigma} = A_{\text{фл}} + A_{\text{т}} + A_{\text{ст}} + A_{\text{дн}}. \quad (3.59)$$

Як очевидно з отриманих рівнянь, робота пластичної деформації залежить від механічних властивостей матеріалу заготовки, ступеня деформації матеріалу, геометричних параметрів виробу.

Дані, наведені в розділі 3, опубліковано в роботах [3, 4, 9] зі списку публікацій Додатка А.

3.5 Висновки

1. Досліджено кінематику процесу течії металу на ребрах матриць при штампуванні-витягуванні. З урахуванням вимоги соленоїдальності отримано систему рівнянь, що описують поле швидкостей переміщень металу на ребрі матриці інструментального штампу у просторі.

2. Отримано системи рівнянь, що описують поля швидкостей деформації, деформацій та їх інтенсивностей в матеріалі деталі на перетяжному ребрі при штампуванні-витягуванні. Уточнено вираз для розрахунку повної роботи деформації.

3. Отримано інтегральне рівняння для розрахунку роботи пластичної деформації листового металу на перетяжному ребрі та встановлено функціональний зв'язок між енергосиловими характеристиками процесу деформування і параметрами режиму штампування-витягування.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ШТАМПУВАННЯ-ВИТЯГУВАННЯ НА ЯКІСТЬ ВИГОТОВЛЕНИХ ДЕТАЛЕЙ

Моделювання процесів механічного оброблення деталей має беззаперечну низку переваг [113, 114] перед натурними експериментами. Це дає змогу істотно спростити технологічну підготовку виробництва, а також скорегувати теоретичні моделі різних процесів [115]. У зв'язку з високим ступенем нелінійності як геометричної, так і матеріальної природи, ефективне цифрове моделювання штампування-витягування потребує програмних засобів, які забезпечують точне відтворення механіки великих пластичних деформацій, складної контактної взаємодії та можливості руйнування матеріалу. Використання сучасних програмних комплексів, таких як Abaqus, Simufact Forming, Deform, LS-DYNA та ін., дає змогу отримати значний масив даних, що спрощує аналіз процесів [116, 117], з можливістю швидкого налаштування вхідних параметрів оброблення, щоб отримати оптимальні характеристики виробу, оминаючи трудомісткий і кошковий експеримент. Крім того, використання таких систем дає змогу уточнювати та верифікувати розроблені теоретичні моделі з використанням обмежених галузевих та експериментальних даних [118, 119]. Також методи моделювання можуть бути реалізовані для моделювання нових технологій [120].

Серед характерних особливостей процесу штампування-витягування, що ускладнюють моделювання, виділимо:

- великі пластичні деформації з локальною нестабільністю;
- анізотропна поведінка матеріалу, особливо у холоднокатаних сталях або алюмінієвих сплавах;
- нелінійна контактна взаємодія з фрикцією, можливим самоконтактом;
- ризик руйнування листа (розрив, зменшення товщини до критичного значення);
- висока чутливість до геометрії інструмента і початкових умов.

Таким чином, цифрове моделювання має враховувати усі перелічені фактори, що істотно підвищує вимоги до програмного забезпечення.

Програмний комплекс Deform призначено насамперед для моделювання об'ємної пластичної деформації в задачах кування, прокатки, пресування тощо. Незважаючи на зручний інтерфейс і адаптацію до виробничих задач, Deform має обмежену функціональність у контексті листового формоутворення:

- імпліцитний розв'язувач не стійкий до великих геометричних змін;
- моделі матеріалу орієнтовані переважно на ізотропну поведінку;
- відсутня повноцінна реалізація моделей пошкодження та ерозії елементів;
- контактна взаємодія реалізована спрощено, що унеможливорює точне врахування локальних явищ на межі інструмент-заготовка.

Таким чином, Deform не забезпечує адекватного опису штампування-витягування у повному фізичному обсязі.

Ansys є універсальним програмним комплексом для моделювання багатьох фізичних процесів, зокрема механіки деформівного тіла. Завдяки широким можливостям імпліцитного аналізу, Ansys дозволяє проводити точні розрахунки задач зі сталими або слабко змінними геометричними властивостями. Проте:

- великі пластичні деформації часто призводять до втрати збіжності розв'язку;
- моделі анізотропії та пошкодження реалізовані через зовнішні макроси (APDL) або розширення;
- відсутня повноцінна підтримка динамічної ерозії елементів при розриві;
- сітка потребує ручного контролю якості й часто потребує перерозбиття.

Таким чином, хоча Ansys потенційно придатний для базового аналізу штампування-витягування, він не дозволяє ефективно моделювати повний спектр фізичних явищ процесу.

LS-DYNA є високопродуктивним середовищем для розрахунку задач з великими деформаціями, сильними нелінійностями і складними контактами. Саме тому він широко використовується у авіа- та автомобілебудуванні для

моделювання процесів штампування, краш-тестів, ударних навантажень тощо.

Основні переваги LS-DYNA:

- експліцитна чисельна схема забезпечує стійкість при великих деформаціях;
- повноцінна підтримка анізотропних моделей матеріалу (Barlat, Hill, YLD);
- реалізація пошкодження та руйнування (моделі GISSMO, Cockcroft–Latham, FLD), включаючи динамічну ерозію елементів;
- потужна контактна механіка з адаптивною фрикцією, самоконтактом, кількома зонами контакту;
- масштабованість розрахунків на багатоядерних та GPU-системах;
- можливість виводу карт поля пошкодження, товщини, напружень, швидкості локалізації тощо.

На відміну від інших розглянутих систем, LS-DYNA спеціалізовано адаптована для динамічного формоутворення, з високою фізичною достовірністю.

Проведений порівняльний аналіз показав, що лише LS-DYNA забезпечує повноцінне врахування всіх ключових фізичних аспектів процесу штампування-витягування: від точної взаємодії інструменту з анізотропною заготовкою до прогнозу ймовірності утворення дефектів. У зв'язку з цим LS-DYNA є оптимальним вибором для цифрового дослідження таких процесів на сучасному рівні вимог до достовірності моделювання.

4.1 Цифрове моделювання штампування-витягування в LS-DYNA

Для перевірки ефективності розрахунку процесів пластичної деформації різних листових матеріалів на основі замкнутої системи рівнянь механіки суцільного середовища при прогнозуванні цифрового моделювання штампування-витягування листового металу була використана модель, яка дозволяє змоделювати розподіл пластичних еквівалентних напружень у листових

частинах на основі програмного забезпечення LS-DYNA. Пакет програмного забезпечення LS-DYNA версії R11.2.2 (версія R11.2-290-g768d145fcb) використовувався для моделювання процесу штампування-витягування листових заготовок.

При моделюванні розглянуто один тип інструментального штампу в якому витягувались деталі з чотирьох матеріалів з різними діаметрами заготовки.

4.1.1 Геометричні моделі

Тривимірні моделі, включаючи пуансон, матрицю, тримач заготовки та заготовку, були змодельовані за допомогою програмного забезпечення SOLID, а потім експортовані до програмного забезпечення LS-DYNA. Завдяки симетрії числовий аналіз процесу штампування-витягування проводився з використанням лише однієї чверті 3D-числової моделі, щоб зменшити час обчислення.

Числову модель частин LS-DYNA, що формують симуляцію, показано на рисунку 4.1.

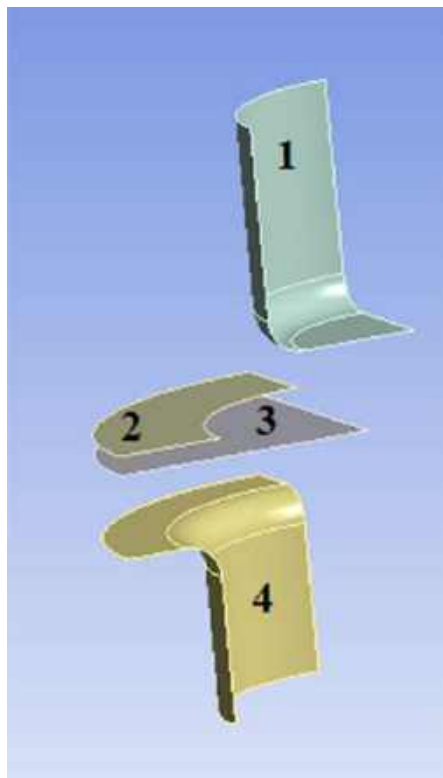


Рисунок 4.1 – Геометрична модель для штампування-витягування:

1 – пуансон; 2 – тримач заготовки; 3 – заготовка; 4 – витяжна порожнина.

Чотири типи штампів для витягування показані на рисунку 4.2 для різних діаметрів заготовок (47 мм, 52 мм, 63 мм і 100 мм) з однаковою товщиною 1 мм $\pm 0,05$ мм. [68, 103, 104].

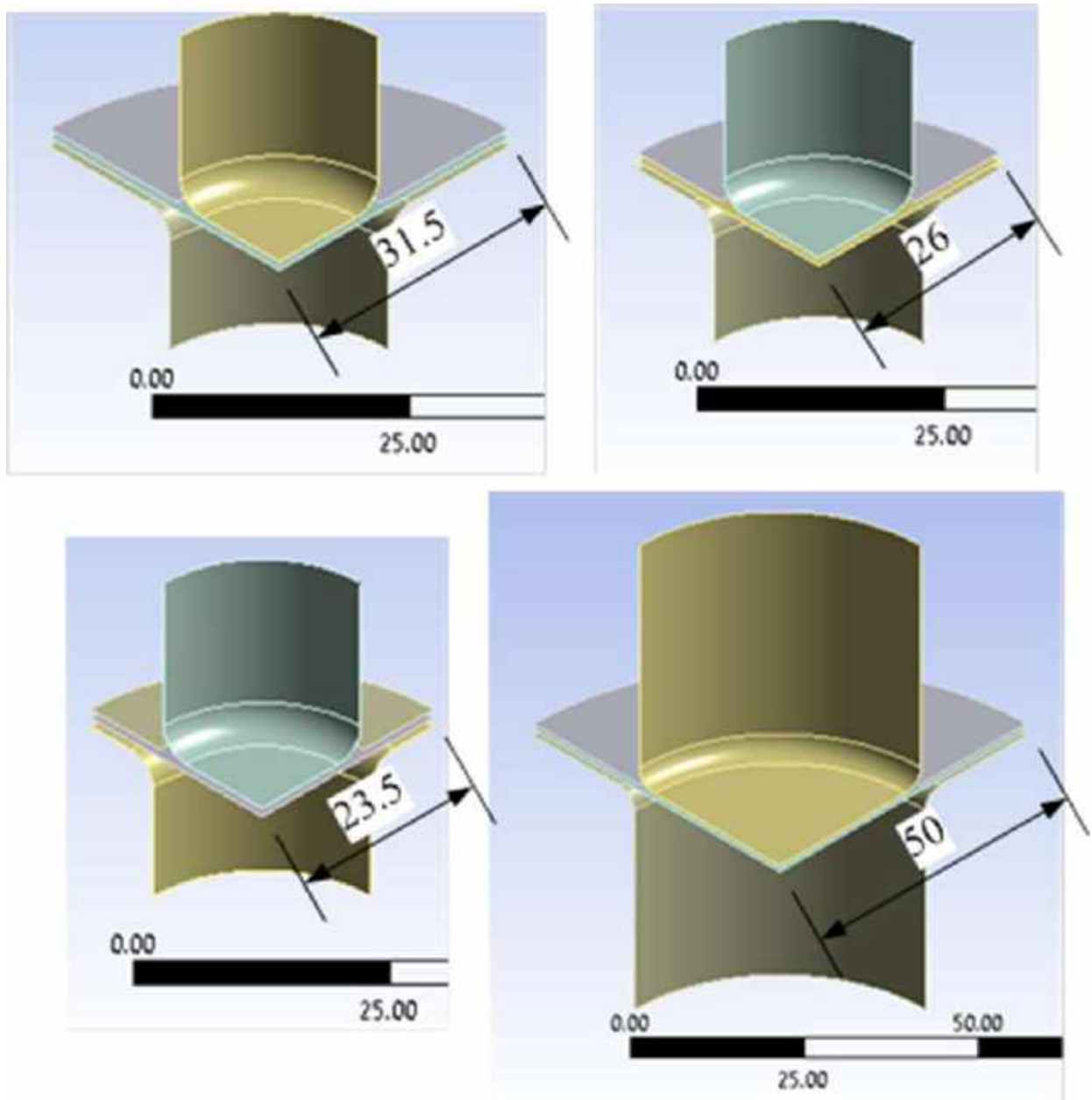


Рисунок 4.2 – Досліджувані моделі

Для отримання достовірних результатів цифрового штампування-витягування необхідне моделювання процесу для забезпечення автоматичних контактних пар під час розв'язування, тобто забезпечення зазорів між деякими деталями у початковому положенні. Тому заготовка піднята над витяжною порожниною на 0,5 мм, але тримач заготовки і пуансон вище (на 1 мм).

4.1.2 Матеріали

Пуансон, матриця та тримач заготовки були визначені як дискретні абсолютно жорсткі тіла, що відповідає присвоєнню матеріалу *MAT_020 з бібліотеки матеріалів LS DYNA [121].

Крім того, деталі визначали як тіла, що деформуються, а властивості матеріалу вибирали з бази даних матеріалів GRANTA [122].

Як відомо, під час скінченно-елементного моделювання операцій штампування листового металу при кімнатній температурі зазвичай використовується крива течії листового металу, випробуваного при одній стандартній швидкості деформації, навіть якщо швидкість деформації різна в різних областях витягнутої деталі та змінюється в широкому діапазоні для заданої швидкості пуансона [123, 124]. Нами здійснено пошук матеріалів з заданими набором властивостей, які наведені у таблиці 4.1. Хімічний склад алюмінієвих і титанових сплавів підсумовано в розділі 4.2.1, і таблиці 4.3.

Таблиця 4.1. Властивості матеріалу заготовки

Матеріал	Модуль Юнга, ГПа	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа	Подовження, %
OT4 (Ti-Al-Mn)	115	550...660	700...900	15...25
Д16Т (Al-Cu-Mg)	72	300...320	440...460	10...17
АМц (Al-Mn)	71	60...130	110...170	10...25
АМг (Al-Mg)	71	120...150	230...300	20...25

Для уточнення механічних характеристик матеріалів перед моделюванням було проведено випробування зразків на розтягування відповідно до стандарту ДСТУ ISO 6892-1:2019. Цей стандарт встановлює методи статичних випробувань на розтягування тонких листів та стрічок із кольорових та чорних металів товщиною до 3,0 мм для визначення характеристик механічних властивостей. Відповідно до рекомендацій стандарту з досліджуваних матеріалів були

виготовлені зразки 2 типу (рисунок 4.3), Випробування зразків на розтягування проводилося на розривній машині ZD-10 (рисунок 4.4) в лабораторії кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства ХАІ. Встановлені за результатами випробувань механічні характеристики матеріалів використовувалися при числовому моделюванні та в аналітичних розрахунках.

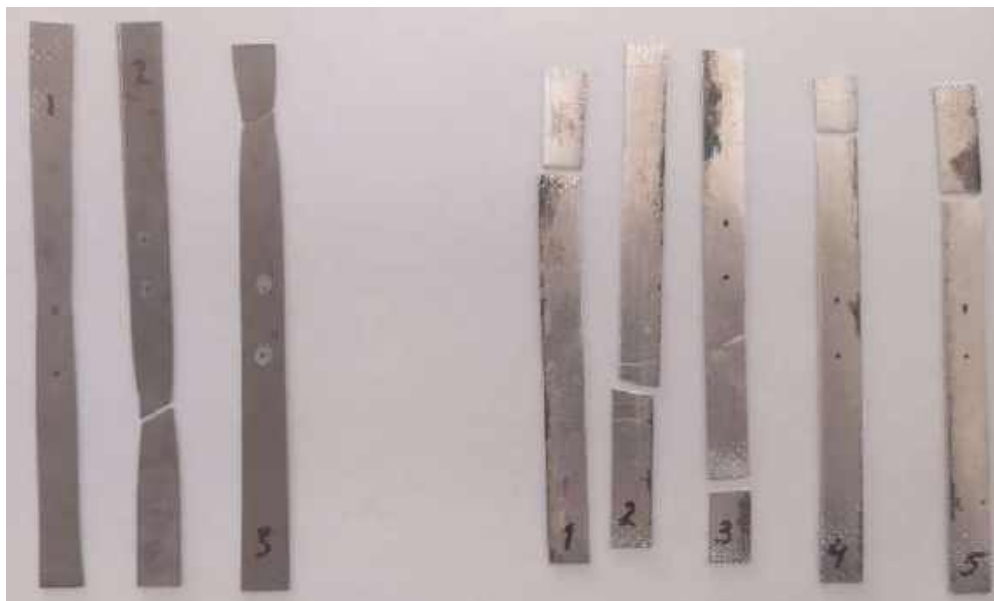


Рисунок 4.3 – Зразки для випробування на розтягування



Рисунок 4.4 – Розривна машина ZD-10

У результаті пошуку виявлено чотири аналоги цих матеріалів, яким віддали перевагу при цифровому моделюванні деталей методом штампування-втягування, оскільки особливі вимоги до матеріалів не висувались. Крім того, в якості вихідних даних ці матеріали мають повні діаграми залежності істинних напружень σ від істинних (логарифмічних) деформацій ε , які показані на рисунку 4.5. Повні їх специфікації наведені у Додатку Б.

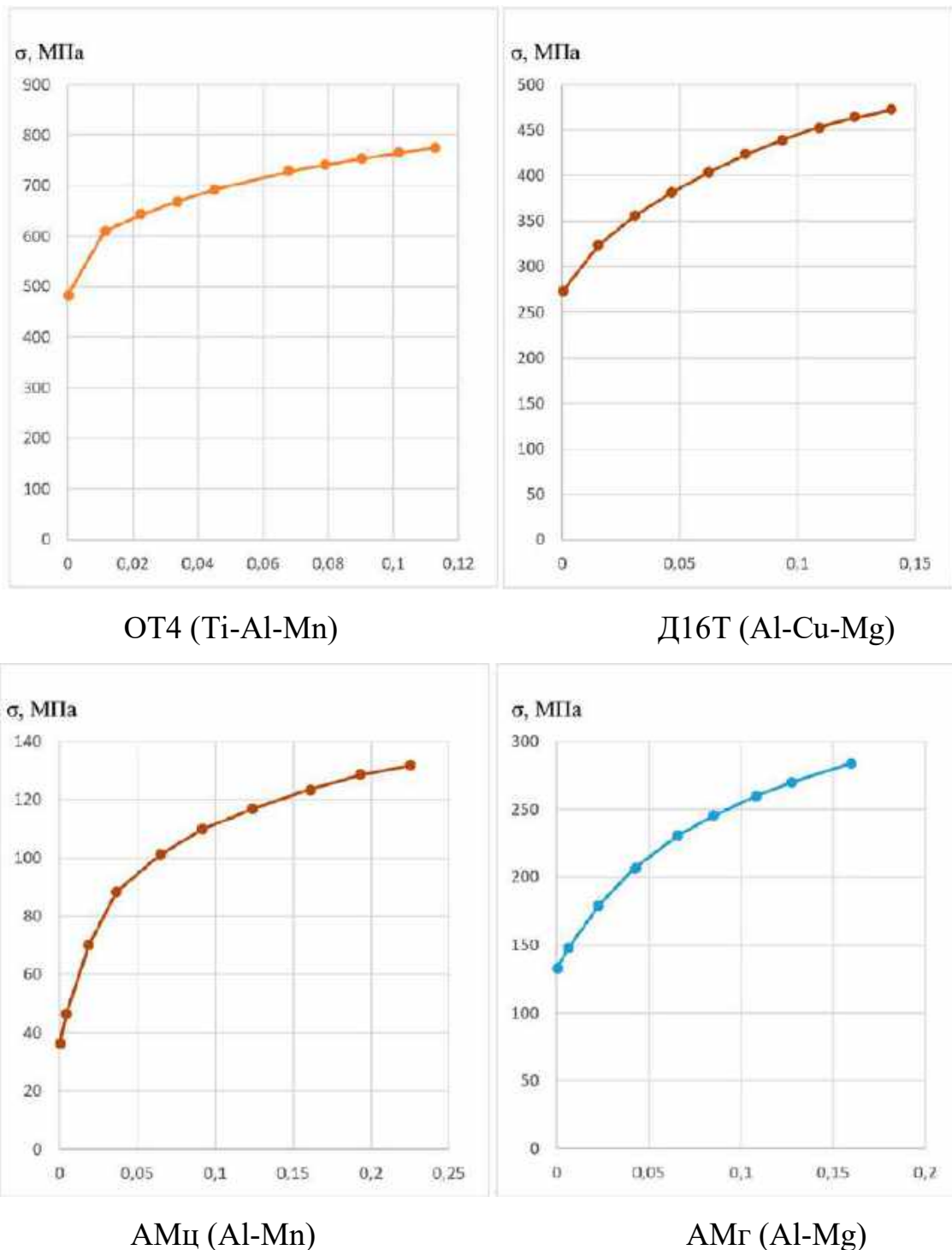


Рисунок 4.5 – Діаграми $\sigma - \varepsilon$ для використаних матеріалів

Для визначення матеріалу в LS-DYNA використовувалася модель *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_24), де напряму вказані діаграми $\sigma - \epsilon$. Деформації, що відповідають руйнуванню матеріалу, приймаються за таблицею 1 (верхні межі).

4.1.3 Контакт і симетрія

Контакти деталей із жорстким пуансоном, порожниною для витягування та тримачем заготовки змодельовано за допомогою контактів на основі методу штрафу *CONTACT_FORMING_SURFACE_TO_SURFACE (Pure Penalty). У цьому контактному алгоритмі перевіряється лише проникнення з боку веденої поверхні, а проникнення з боку провідної поверхні не враховується, що робить обчислювальний алгоритм більш ефективним. Товщина металу, яка використовується для визначення контактних пар, приймалася рівною 1 мм для деталі (реальний розмір), і рівною нулю для елементів штампа.

У цифровому моделюванні штампування листового металу класичний закон Кулона зазвичай використовується для опису характеристик тертя, тому була прийнята ця модель тертя між заготовкою та деталями матриці. Коефіцієнт тертя між сталевими частинами матриці та листом було встановлено на рівні 0,3 для титану та 0,18 для алюмінієвих сплавів на основі попередніх досліджень трибологічних експериментів, які проводили моделювання штампування та витягування алюмінію за різних умов процесу [125, 126] та титанових сплавів [126-128] відповідно.

Крім того, вплив коефіцієнта тертя на потенційну глибину штампування-витягування деталі досліджували за допомогою цифрового експерименту на титановій деталі діаметром 47 мм, результати показані на рисунку 4.6.

Як бачимо, значний вплив коефіцієнта тертя спостерігається в діапазоні від 0 до 0,1, а подальше збільшення коефіцієнта тертя не призводить до суттєвого зменшення глибини витягування.

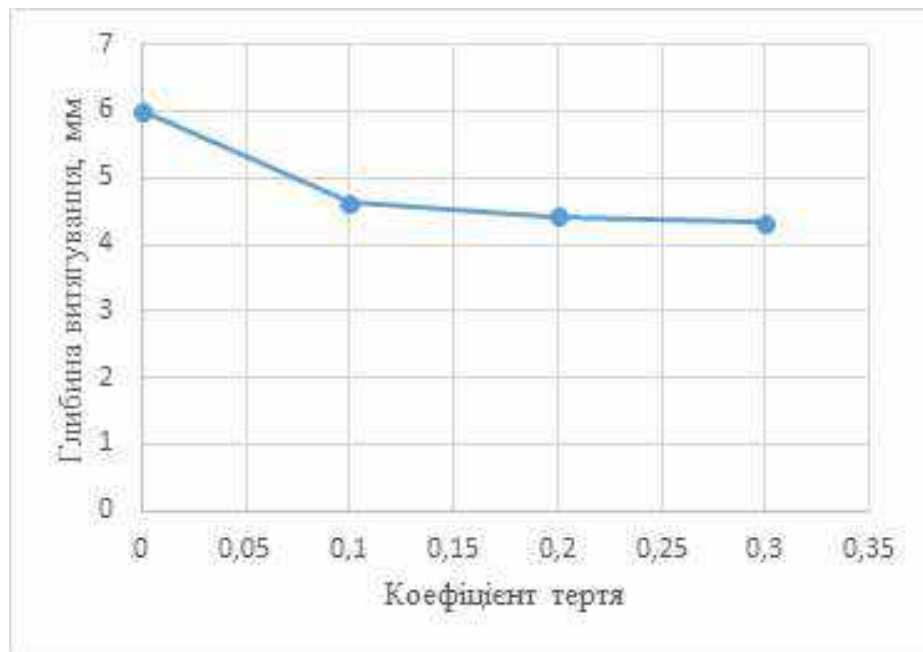


Рисунок 4.6 – Глибина витягування для різних коефіцієнтів тертя

4.1.4 Скінченно-елементна модель

Геометрична модель заготовки розбита на чотиривузлові елементи оболонки, в яких використовується модель Belytschko-Tsay з урахуванням зміни товщини. У прийнятому методі Гаусса, інтегрування по товщині здійснюється в десяти точках.

Для визначення розміру скінченного елемента розраховано процес деформування титанової заготовки діаметром 47 мм з розмірами елементів 2 мм, 1,5 мм, 1 мм і 0,5 мм; з адаптивною зміною скінченно-елементної сітки та зменшенням розміру елемента до 0,25 мм. Максимальна глибина витягування заготовки була контрольованим параметром (результати наведені в таблиці 4.2 і на рисунку 4.7).

Таблиця 4.2. Вплив розміру сітки скінченних елементів на глибину витягування

Розмір скінченного елемента, мм	Глибина витягування, мм	Похибка, %
2	5,14	6,49
1,5	4,54	17,44
1	5,77	4,92
0,5	5,47	0,41
0,25 (адаптивна сітка)	5,50	–

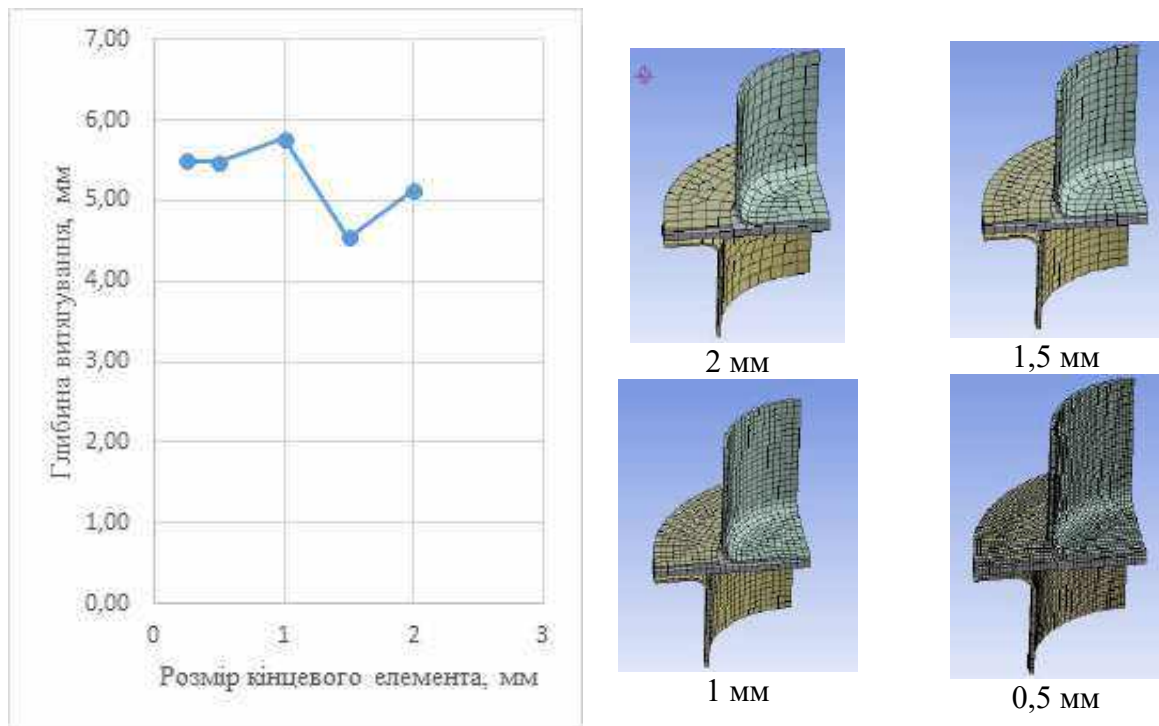


Рисунок 4.7 – Максимальна глибина витягування для різних розмірів скінченних елементів

Таким чином, модель з розміром елемента 1 мм призводить до похибки, що не перевищує інженерної точності 5%; отже, у всіх розрахунках скінченно-елементну сітку будували з розміром комірки 1 мм. Така похибка пояснюється обраним методом інтегрування Гауса для 10 контрольних точок, який є найточнішим у пакеті LS-DYNA для вирішення поставленої задачі.

4.1.5 Налаштування вирішувача LS-DYNA, обмеження та завантаження моделі

Оскільки динамічне зміцнення не вказувалося у властивостях матеріалу, то швидкість деформації не враховувалася, а швидкість штампу була збільшена в середньому до 15 мм/с, при такому значенні швидкості кінетична енергія залишається незначною.

Ці результати були підтверджені чисельним експериментом (один розрахунок проводився при швидкості 3 мм/с), підвищення динаміки процесу жодним чином не вплинуло на кінцевий результат, але значно заощадило

обчислювальні ресурси [68]. Під час процесу переміщення порожнина штампу була фіксована в усіх напрямках, тоді як тримач заготовки та пуансон могли рухатися по вертикалі (вісь Z), ці рухи показано на рисунку 4.8.

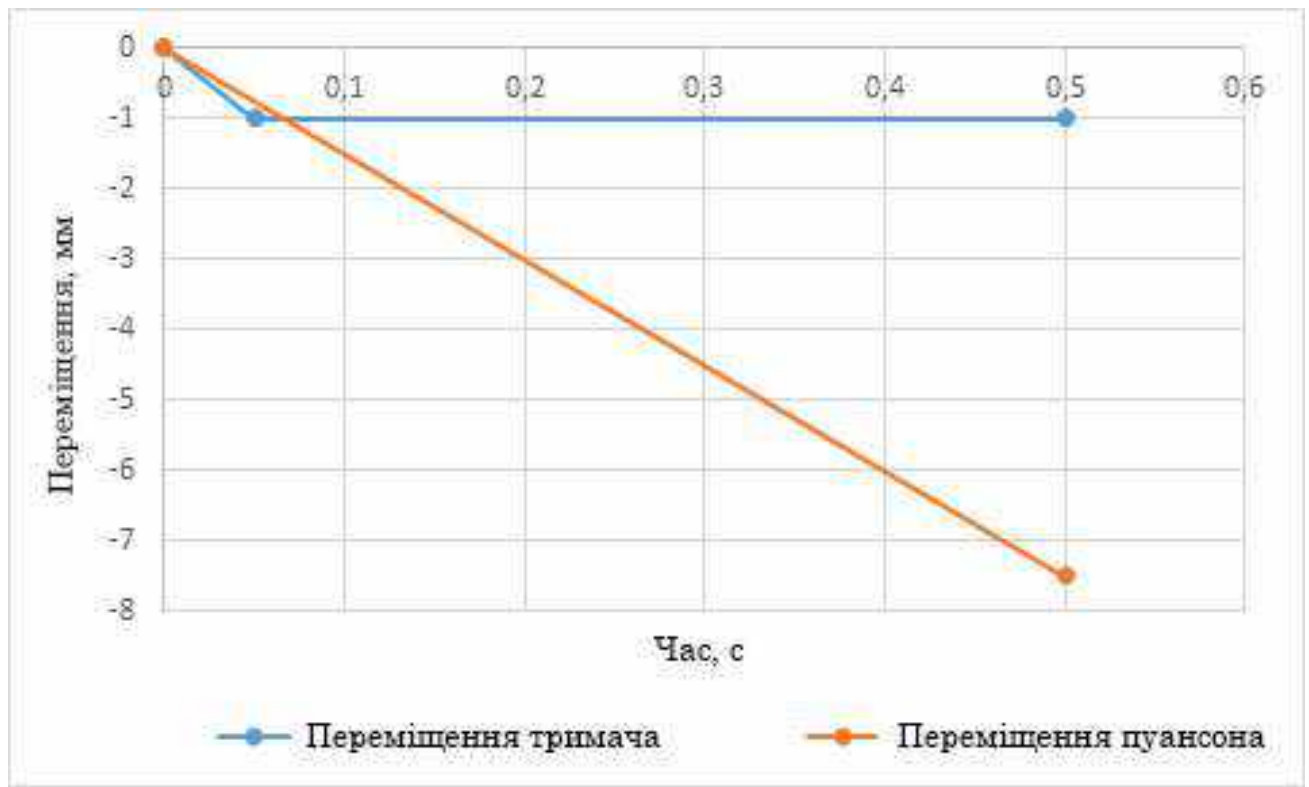


Рисунок 4.8 – Переміщення тримача заготовки та пуансона

Щоб усунути зазор, тримач заготовки перемістився на 1 мм протягом перших 0,005 с для встановлення контакту з деталлю, а пуансон весь час рухався рівномірно, забезпечуючі контакт із заготовкою після затиску. Процес штампування-витягування листового металу тривав до руйнування конструкції заготовки.

4.1.6 Виконання розрахунків

Під час розрахунку нами контролювався енергетичний баланс (див. рисунок 4.9). Слід зазначити, що енергія деформації (Internal Energy) і енергія контакту (Contact Energy) починають зростати в момент часу $t = 0,068$ с, після контакту пуансона і заготовки (рисунок 4.9, точка 3; рисунок 8, в).

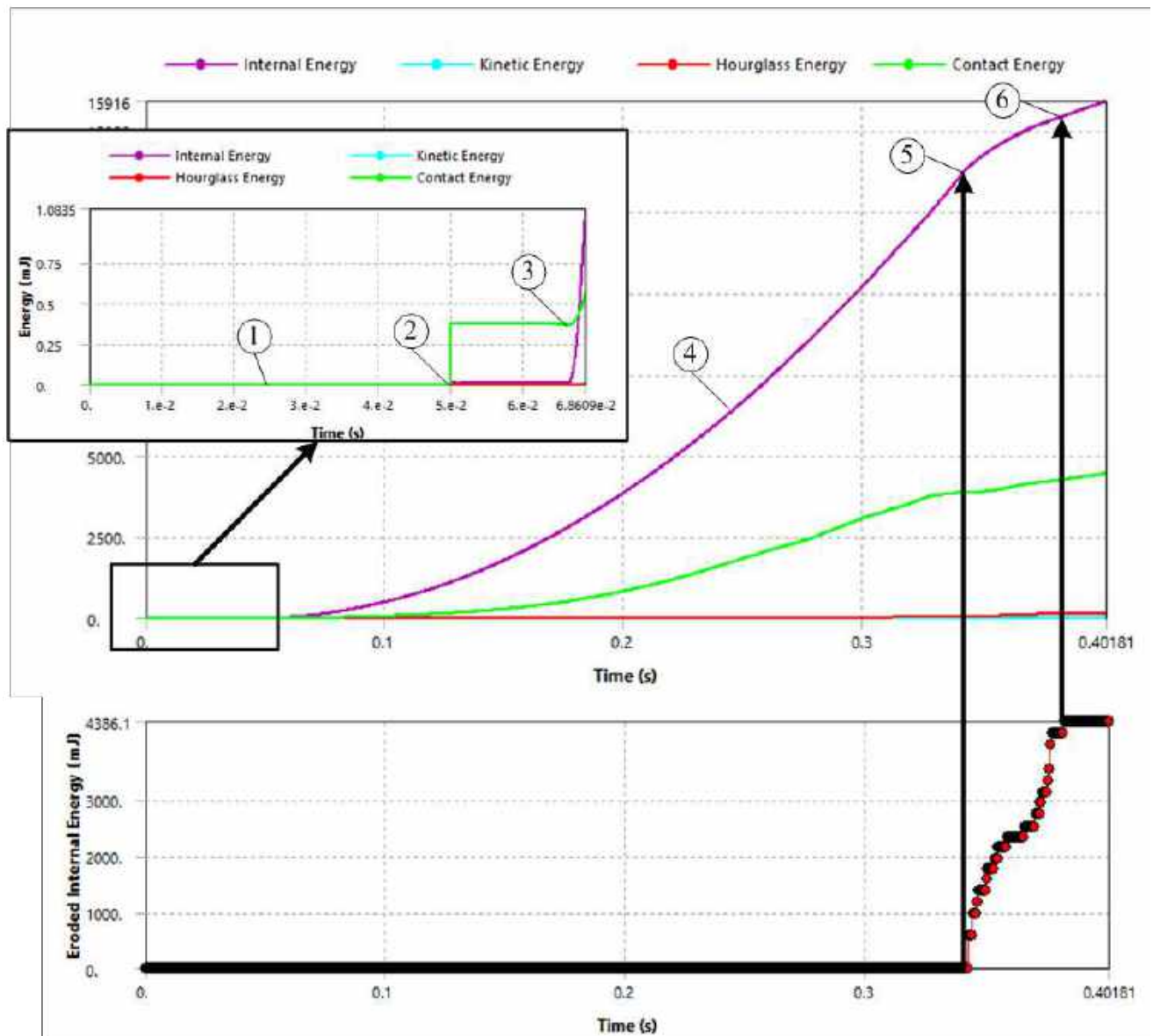


Рисунок 4.9 – Енергетичний баланс

До цього, в момент $t = 0,025$ с тримач заготовки входить в контакт із заготовкою (рисунок 4.9, точка 1, рисунок 4.10, а) і потім при $t = 0,05$ с заготовка притискається до штампу (рисунок 4.9, точка 2, рисунок 4.10, б). Далі з точки 3 по 5 відбувається штампування-витягування (вигляд заготовки в середній точці 4 наведено на рисунок 4.10, г).

У точці 5 починається руйнування матеріалу в зоні з'єднання дна зі стінкою (рисунок 4.10, д), про що свідчить поява енергії структурного руйнування (Eroded Internal Energy) та повний відрив дна в точці 6 (рисунок 4.9 і рисунок 4.10, е) [103, 104].

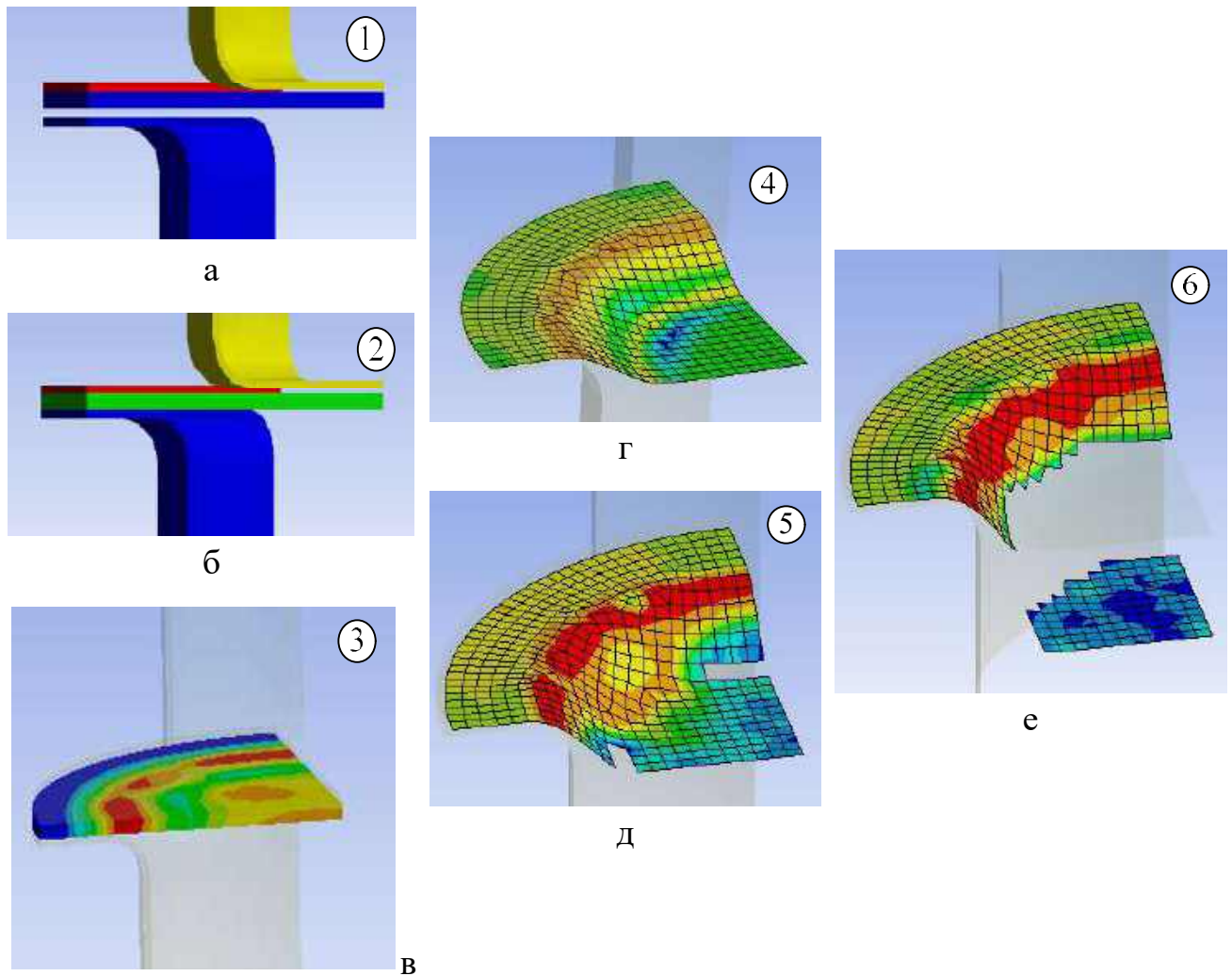


Рисунок 4.10 – Процес штампування-витягування (деформація та руйнування конструкції деталі)

4.2 Матеріали та експериментальні дослідження

4.2.1 Властивості матеріалу

Останнім часом для виготовлення листових деталей використовують алюмінієві, титанові та магнієві сплави. Серед усього різноманіття, алюмінієві сплави найбільш широко використовуються в машинобудуванні через їх низьку вартість і гарне штампування.

При виборі матеріалів для дослідження ми керувалися не тільки поширенням матеріалів в авіаційній промисловості, а й у загальному машинобудуванні, тому заготовки для експериментальних досліджень були

виготовлені з трьох алюмінієвих сплавів АМг (Al-Mg), АМц (Al-Mn) і Д16Т (Al-Cu-Mg), а також титанового сплаву ОТ4 (Ti-Al-Mn), хімічні склади яких наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Хімічний склад матеріалів за специфікаціями постачальника у %

Матеріал	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Cr	Zn	Zr	Ti	Al
ОТ4 (Ti-Al-Mn)	≤0,12	–	0,8÷2	≤0,3	–	–	–	≤0,3	інше	3,5÷5
Д16Т (Al-Cu-Mg)	≤0,5	1,5÷ 1,8	0,3÷0,9	≤0,5	3,8÷4,9	≤0,1	≤0,2 5	–	≤0,15	інше
АМц (Al-Mn)	≤0,6	≤0,2	1÷1,6	≤0,7	≤0,1	–	≤0,1	–	≤0,2	інше
АМг (Al-Mg)	≤0,5	≤6	0,5÷0,8	≤0,5	≤0,2	–	≤0,2	–	0,02÷0 ,1	інше

4.2.2 Налаштування експерименту

Експерименти проводили в лабораторії кафедри технологій виробництва авіаційних двигунів та енергетичних установок Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» з використанням модифікованого лабораторного гідравлічного пресу П-125, на установці для штампування та витягування (рисунок 4.11).

Технологічне оснащення для проведення експериментів складається з матриці (радіус ребра дорівнює 3 мм), пуансонів (діаметри 28 мм та 57 мм для листа 100 мм), тримача заготовки, прилада для вимірювання навантаження (манометра) та гідравлічного джерела живлення.

Досліди штампування-витягування проводили на зразках листового металу товщиною 1 мм. Таким чином, для забезпечення контактного тиску матриця з тримачем заготовки утримується нерухомо, а пуансон переміщується гідравлічним пресом. Тиск утримання заготовки підтримувався на рівні 1 Н/мм² і

2 Н/мм² за допомогою трьох болтових з'єднань із регулюванням навантаження за допомогою динамометричного ключа; середня швидкість пуансона була збережена на рівні 3 мм/с.

Зважаючи на обмежений раніше отриманий результат [104], ми розширили кількість зразків і додали ще один розмір заготовки. Зокрема, штампування-витягування було виконано із заготовок різного діаметру (47 мм, 52 мм, 63 мм і 100 мм), як показано на рисунку 4.12.



Гідравлічний прес



Оснащення для штампування-витягування

Рисунок 4.11 – Експериментальна установка штампування-витягування

Процес витягування проводився в регульованому інструментальному витяжному штампі (див. рисунок 4.11); розривне навантаження визначали за допомогою каліброваного манометра. Щоб імітувати умови контакту в процесі промислового штампування-витягування, поверхню листів залишали у стані поставки, тобто алюмінієві заготовки змащені твердою змазкою, а титанові сплави витягувались в сухому стані. У зв'язку з тим, що титан і його сплави відносяться до матеріалів, які дуже важко піддаються обробці методом холодного штампування, особливо листового, були змінені умови його витягування. Тому для досягнення бажаної високої якості готової титанової деталі нами було збільшено номінальний контактний тиск порівняно з

алюмінієвими сплавами. Отже, було розглянуто два номінальних контактних тиску: 1 Н/мм^2 для алюмінієвих сплавів і 2 Н/мм^2 для титанових сплавів відповідно. Ці значення являють собою типові умови процесу штампування-витягування листів з алюмінієвих і титанових сплавів.



Рисунок 4.12 – Деталі після розривного навантаження (зусилля)

Залежність найбільшого навантаження витягування заготовок показано на рисунку 4.13 для трьох стандартних розмірів матеріалів. Усі деталі діаметром 100 мм, окрім титану, зазнали руйнування під час процесів штампування та витягування листового металу, тому ця частина дослідження не представлена на діаграмі.

Проведено дослідження впливу ступеня витягування та марки матеріалу заготовки на якість одержуваних деталей та зусилля штампування-витягування. Підтверджено, що вплив ступеня витягування на зусилля прямо пропорційний та залежить від границь текучості та міцності матеріалу. Так найменші зусилля витягування спостерігались при деформуванні сплаву низької міцності АМц (Al-Mn), а найбільші – при штампуванні-витягуванні титанового сплаву ОТ4 (Ti-Al-Mn), для якого не було визначено граничного ступеня витягування. Визначено граничний ступінь витягування для досліджуваних матеріалів, а саме для сплавів: АМг (Al-Mg) та Д16Т (Al-Cu-Mg) в межах $1,6 \dots 1,64$; для АМц (Al-Mn) – $1,6 \dots 1,7$; для ОТ4 (Ti-Al-Mn) – вище за 2,1. Крім того, у більшості

випадків руйнування відбувається майже на початку процесу деформації на сформованому дні [104].

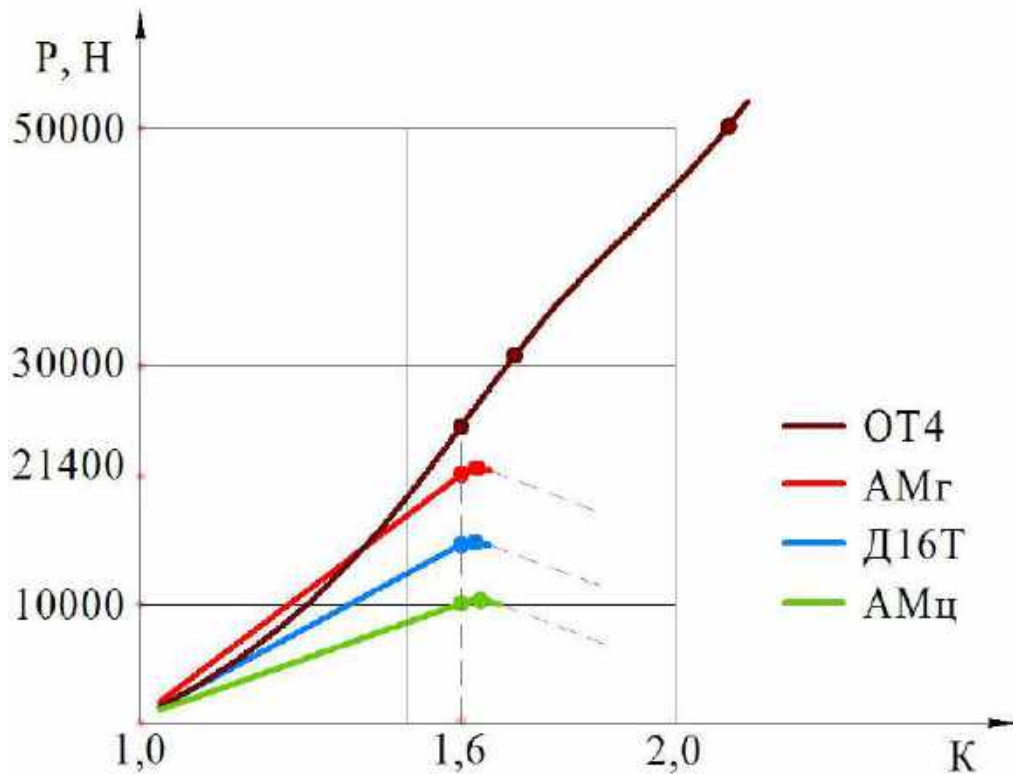


Рисунок 4.13 – Залежність зусилля витягування від степеню витягування для різних матеріалів

Зауважимо, що процес деформування для пластичних алюмінієвих сплавів ближче до процесу штампування. Крім того, прогнозовані результати випробувань доводять, що більш міцні сплави мають значно більші деформації перед руйнуванням, що потребує більших зусиль.

4.3 Підтвердження теоретичної моделі експериментальними даними

Відповідно до звичайної практики, отримані результати теорії та експериментальних даних необхідно проаналізувати для досягнення реалістичної та точної моделі, яка дозволяє нам більш ефективно оцінювати процес штампування-витягування [129, 130].

Картини ізополів інтенсивності (як зазначено на рисунку 4.14) ілюструють напруження, отримані в результаті цифрового моделювання.

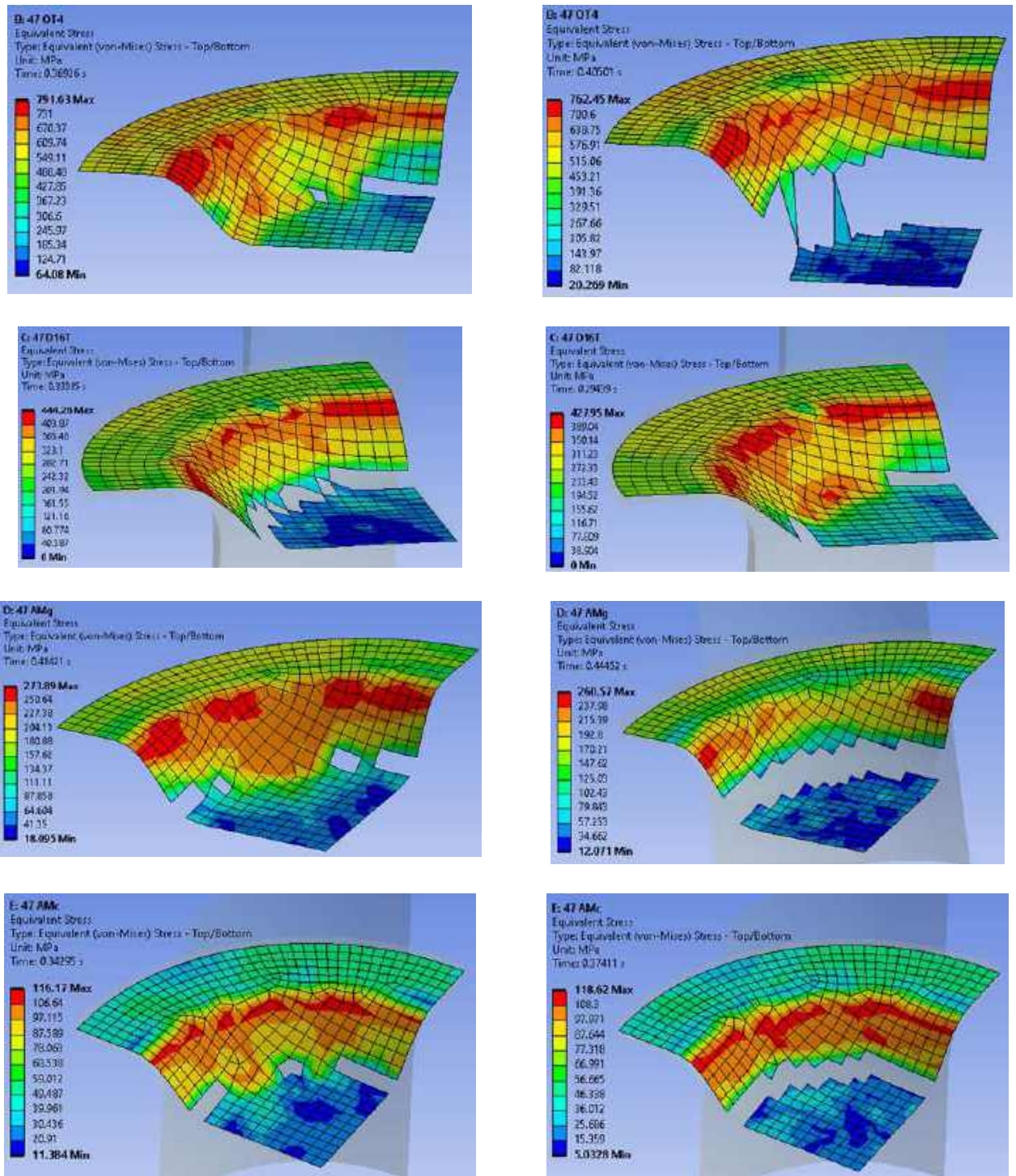
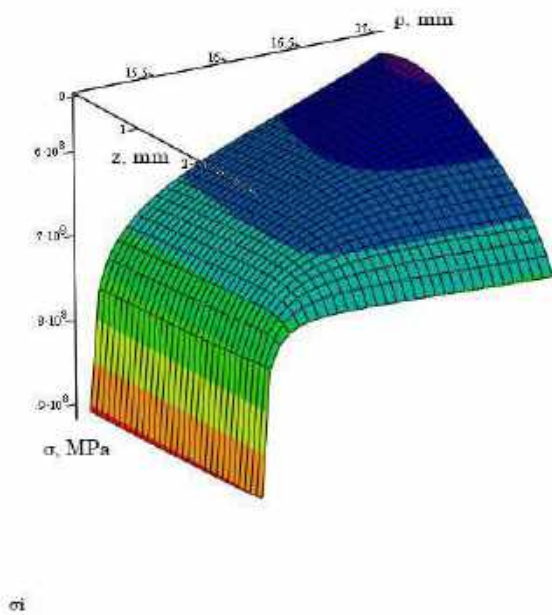
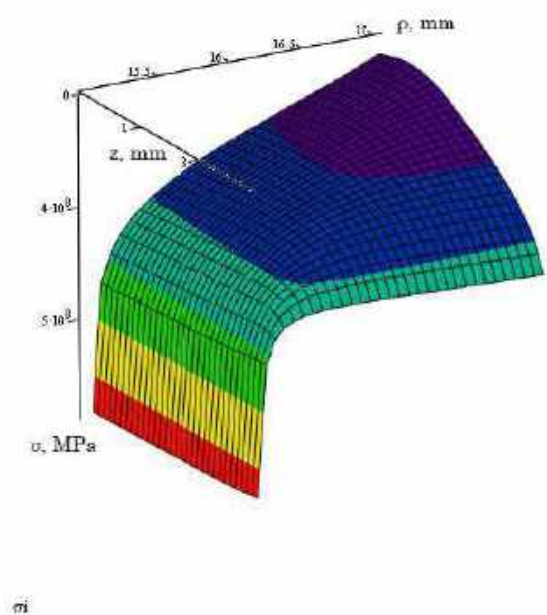


Рисунок 4.14 – Змодельований розподіл пластичного еквівалентного напруження у процесі штампування-витягування

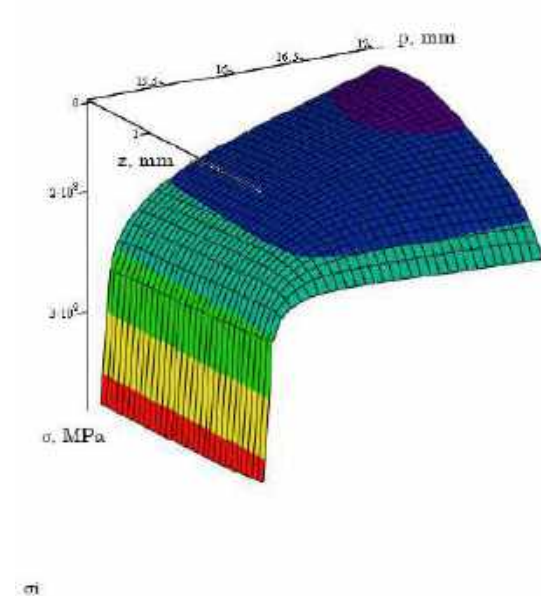
На нашу думку, цікаво графічно відобразити отримані рівняння за конкретних умов оброблення. У зв'язку з цим, побудовано графіки розподілу інтенсивності напружень під час штампування-витягування (див. рисунок 4.15) з вихідними даними: $r = 3$ мм, $R = 18$ мм і $V = 3$ мм/с; що відповідає діаметру матриці робочої частини 30 мм та перетяжному ребру 3 мм.



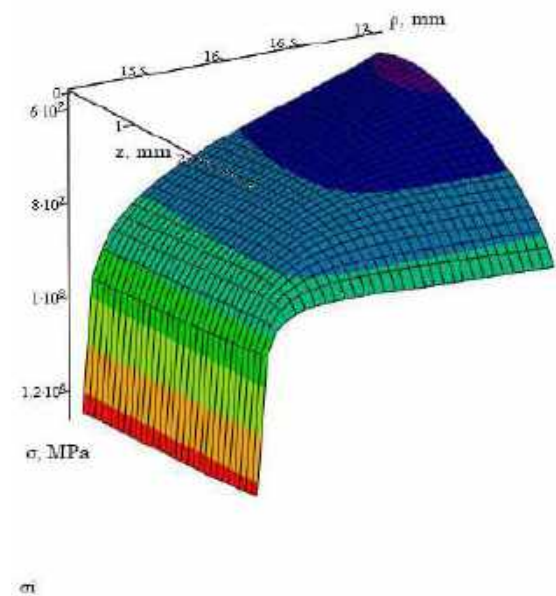
OT4



D16T



AMγ



AMц

Рисунок 4.15 – Розрахунковий розподіл інтенсивності напружень у процесі штампування-витягування

Як бачимо, між отриманими результатами змодельованого розподілу еквівалентного напруження та розрахунковим розподілом інтенсивності напружень існує кореляція, а саме прогнозований розподіл інтенсивності напружень прийнятно узгоджується з цифровим моделюванням. Для всіх

матеріалів дослідження, як і очікувалося, максимальне значення напружень спостерігається на ребрі матриці. Напруження, зареєстровані в момент руйнування матеріалу і момент повного відриву, незначно відрізняються, відхилення не перевищує 5 %...10 %. Також спостерігається невелике зниження напружень у момент відриву дна, що пояснюється зменшенням навантаження внаслідок полегшення ходу пуансона. Результати розрахунку наведено у додатку В.

Теоретичний розрахунок інтенсивності напружень проводився за формулою (3.32) з умови ізотропності матеріалів, що дозволило прийняти збіг головних осей напруженого та деформованого станів. Таким чином, для суттєвого спрощення розрахунку інтенсивності напружень нами були розраховані інтенсивності деформацій та швидкості деформацій для основних лінійних деформацій. Тому в моделі ми прийняли значення $\psi = 0$ в момент часу, що передує руйнуванню заготовки та відповідає максимальному навантаженню. Таким чином, ми зробили висновок, що теоретична модель є прийнятною для розрахунку всього комплексу енергосилових характеристик процесу штампування-витягування.

4.4 Дослідження якості отриманих виробів

Як було зазначено вище, при проведенні експерименту були отримані деталі штампуванням-витягуванням у вигляді стаканів. Відповідно до розділу 2 було проведено дослідження якісних показників одержаних деталей. Як аналізовані параметри було обрано кривину, овальність та стоншення деталей. Дослідження на кривину та овальність проводились для деталей з діаметром початкової заготовки 52 мм, а на стоншення – для деталей з діаметрами початкової заготовки 47 мм та 100 мм.

Дослідження кривини деталі проводилися шляхом вимірювання висоти деталі у восьми точках на зовнішньому діаметрі заготовки, які показано на рисунку 4.16. Результати вимірювань наведено у таблиці 4.4.

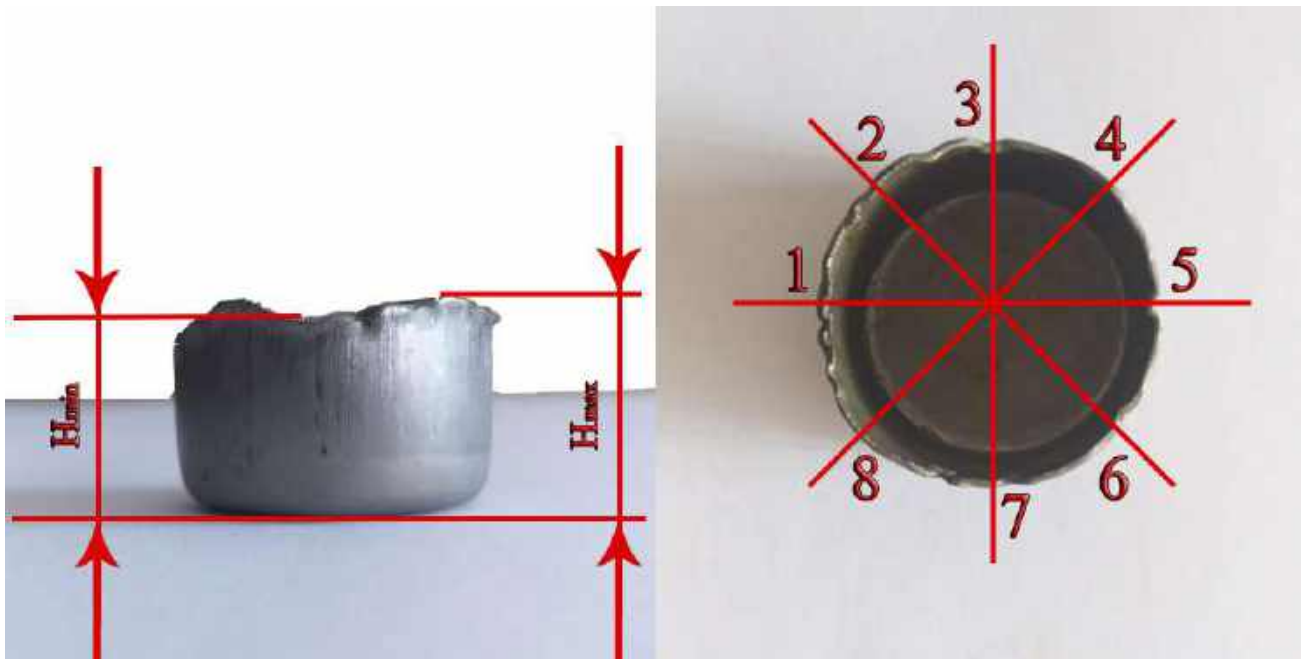


Рисунок 4.16 – Вимірювання деталей, отриманих штампування-витягуванням

Таблиця 4.4 – Результати вимірювання кривини деталей

Точка вимірювання	1	2	3	4	5	6	7	8
Матеріал заготовки	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
ОТ4	15,8	16,6	18,3	17,4	16,9	18,6	18,1	18
АМц	15,8	16,1	15,3	16,2	16,3	16	16,9	16,1
АМг	15,4	15,2	15,3	15	15,3	14,4	14,8	15,2

Відповідно до результатів вимірювання та формул, наведених у розділі 2, обчислюємо значення кривини

$$\delta_H = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\text{ср}}} \cdot 100, \% \quad (4.1)$$

де $H_{\text{ср}} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 H_i$, i – номер вимірювання.

Результати розрахунків для деталей, виготовлених з матеріалів ОТ4, АМц та АМг, наведено у таблиці 4.5

Таблиця 4.5 – Результати розрахунків кривини отриманих виробів

Матеріал заготовки	H _{ср} , мм	δ _н , %	P, кН
ОТ4	17,46	16,04	30
АМц	16,09	9,94	10
АМг	15,08	6,63	15

Аналіз результатів вимірювань в поздовжньому напрямку показує, що найбільшу кривину мають деталі з ОТ4 (16,04 %) при зусиллі витягування 30 кН, а найменшу з АМг (6,63 %) при зусиллі 15 кН. Також спостерігається найбільше відхилення за висотою деталі з титанового сплаву ОТ4 – 17,5 мм та найменше з АМг – 15,1 мм. Середні значення похибки у поздовжньому напрямку спостерігаються у сплаву АМц при мінімальному значенні зусилля витягування 10кН, що пояснюється високою пластичністю та порівняно низькою зі сплавом АМг міцністю.

Дослідження овальності деталі ми проводили шляхом вимірювання діаметрів деталі у восьми точках (попарно, розташовані одна навпроти другої) на зовнішньому діаметрі заготовки, які показано на рисунку 4.16. Результати вимірювань наведено у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Результати вимірювання овальності деталей

Точки вимірювання	1-5	2-6	3-7	4-8
Матеріал заготовки	мм	мм	мм	мм
ОТ4	29,7	29,6	30,1	29,9
АМц	29,2	29,5	29,4	29,6
АМг	29,4	29,8	29,7	30

Відповідно до результатів вимірювання та формул, наведених у розділі 2, обчислюємо значення овальності

$$\delta_d = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{ср}}^j} \cdot 100, \% \quad (4.2)$$

де $d_{cp} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 d_i$, i – номер діаметра вимірювання.

Для наочності покажемо реальний профіль зовнішнього діаметра деталей, виготовлених з титанового сплаву ОТ4 (рисунок 4.17), та з алюмінієвих сплавів АМц (рисунок 4.18) та АМг (рисунок 4.19).

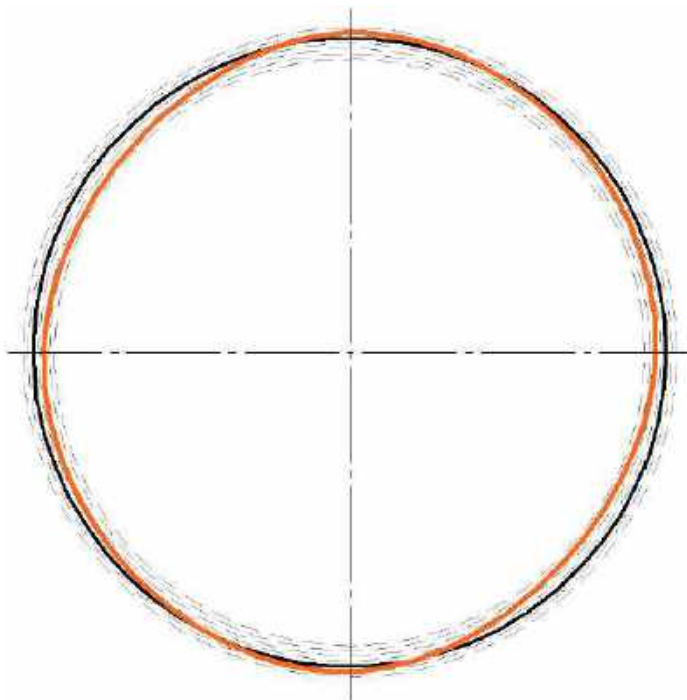


Рисунок 4.17 – Реальний профіль зовнішнього діаметра деталі (ОТ4)

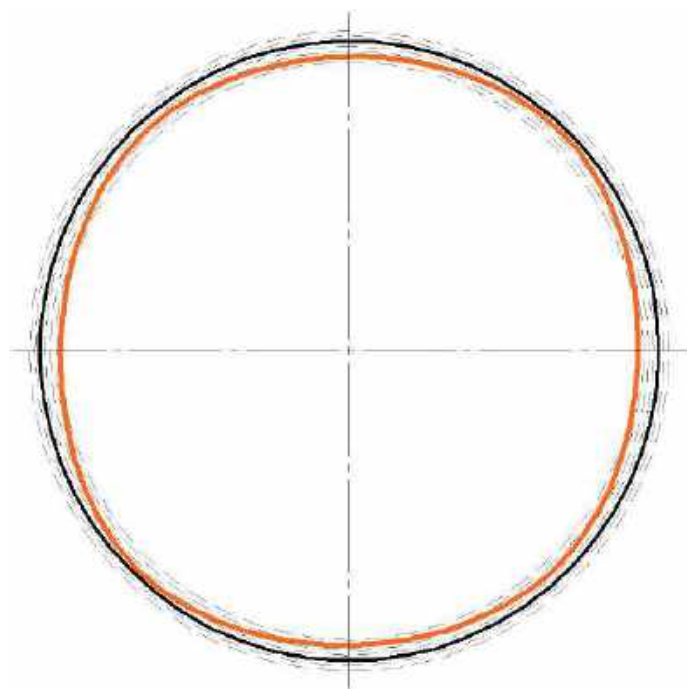


Рисунок 4.18 – Реальний профіль зовнішнього діаметра деталі (АМц)

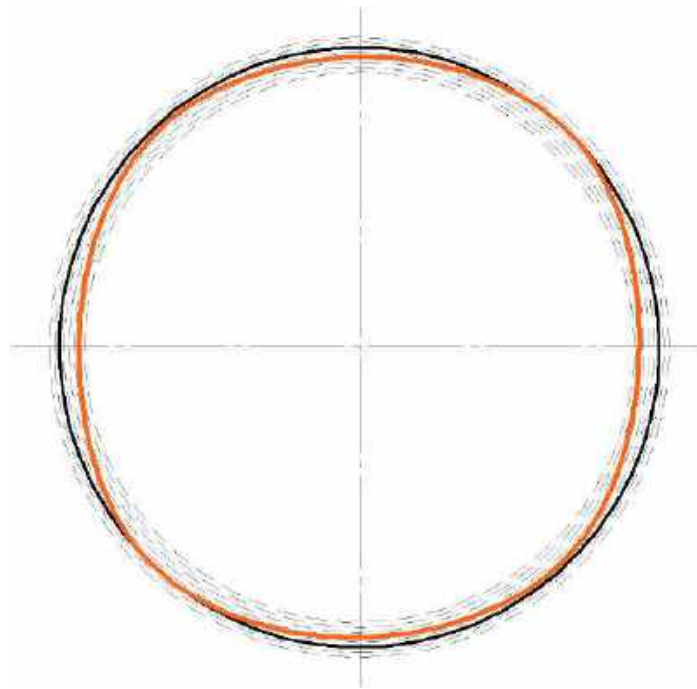


Рисунок 4.19 – Реальний профіль зовнішнього діаметра деталі (АМг)

Результати розрахунків для деталей, виготовлених з матеріалів ОТ4, АМц та АМг, наведено у таблиці 4.7

Таблиця 4.7 – Результати розрахунків овальності отриманих виробів

Матеріал заготовки	d_{cp} , мм	δ_d , %	P, кН
ОТ4	29,83	1,68	30
АМц	29,43	1,36	10
АМг	29,73	2,02	15

Похибка деталей у поперечному напрямку має дещо інший характер, ніж у поздовжньому. Так, найбільшу овальність мають деталі зі сплаву АМг – 2 % за зусилля витягування 15 кН, а найменшу з АМц – 1,4 % за 10 кН, що лежать в межах допуску 0,080 мм (відповідає 10...12-му квалітету точності розміру відносної геометричної точності А). При цьому значення середнього діаметра деталей збільшується зі зростанням зусилля витягування, що мабуть пояснюється калібруючою дією пуансона, який розподіляє рівномірно навантаження по периметру поперечного перерізу деталі. Середня овальність

деталей з ОТ4 (1,7 %) за більшого зусилля витягування, у порівнянні з алюмінієвими, пояснюється значною межею плинності матеріалу.

За результатами експериментів було проведено вимірювання товщини отриманих виробів для оцінювання стоншення профілю деталей після штампування-витягування у різних місцях деталі, як показано на рисунку 4.20. Результати вимірювань товщини зведено до таблиці 4.8.

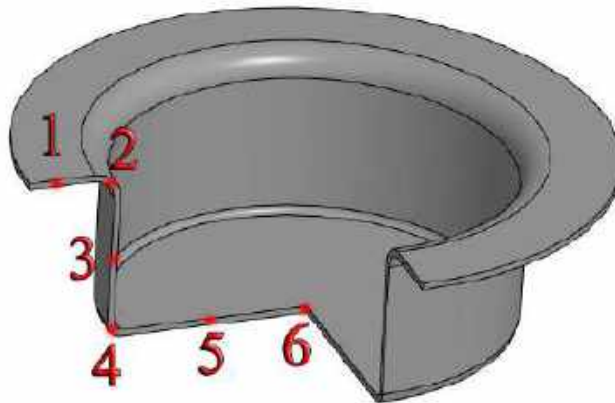


Рисунок 4.20 – Схема вимірювання товщини отриманих виробів

Таблиця 4.8 – Результати вимірювань товщини виробів

Точка вимірювання	1	2	3	4	5	6
Матеріал заготовки	мм	мм	мм	мм	мм	мм
ОТ4	0,99	0,94	0,91	0,81	0,87	0,99
АМц	1,05	0,95	0,96	0,89	0,94	0,96
АМг	1,07	0,98	0,93	0,8	0,9	1,03
Д16Т	1,05	0,94	0,95	0,91	0,97	1,00

Для наочності побудуємо графіки розподілу товщини по відповідних ділянках деталей (рисунки 4.21, 4.22).

Характер зміни товщини стінки деталі для всіх матеріалів, що досліджуються, однаковий. Як видно на графіках розподілу товщини отриманих виробів, спостерігається тенденція появи стоншення деталей, починаючи з області перетяжного ребра та вздовж стінки, досягаючи найбільшого значення в

зоні переходу деталі зі стінки у дно, що відповідає зоні контакту радіуса пуансона з витягуваною деталлю. Уздовж дна бачимо стоншення деталі у міру наближення до радіуса переходу стінки деталі у дно, а в центрі деталі можемо спостерігати збереження початкової товщини з незначними відхиленнями.

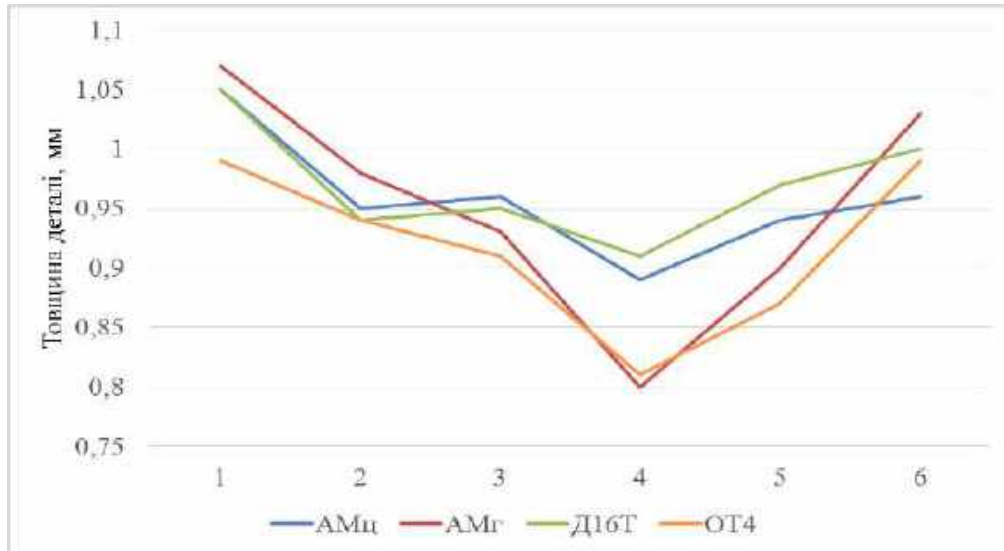


Рисунок 4.21 – Розподіл товщини деталей на відповідних ділянках (47 мм)

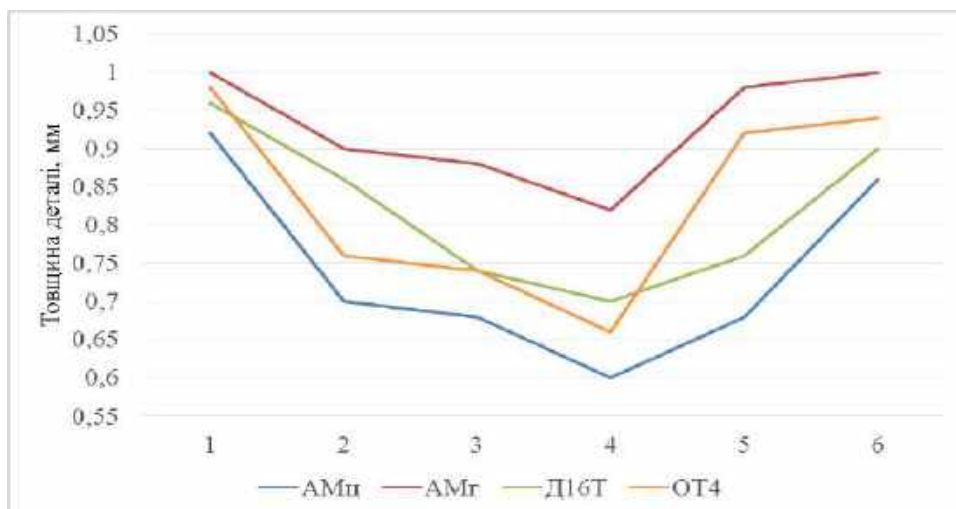


Рисунок 4.22 – Розподіл товщини деталей на відповідних ділянках (100 мм)

При цьому мінімальні значення товщини в зоні сполучення дно-стінка знаходяться в залежності від марки металу в межах 0,8...0,91 мм для ступеня витягування 1,57 та 0,6...0,82 мм – для 1,75 відповідно.

Дані, наведені в розділі 4, опубліковано в роботах [3, 9, 10] зі списку публікацій Додатка А.

4.5 Висновки

1. Результати цифрового моделювання штампування-витягування у програмному комплексі LS-DYNA демонструють відповідність як інженерним оцінкам отриманим з використанням теоретичної моделі, так і натурному експерименту. Зокрема максимальні напруження, зареєстровані в момент руйнування та момент повного відділення матеріалу, відрізняються від теоретичних розрахунків не більш ніж на 5...10 % для всіх досліджуваних матеріалів.

2. Проведено дослідження впливу ступеня витягування та марки матеріалу заготовки на якість одержуваних деталей та зусилля штампування-витягування, що дало змогу встановити таке:

- вплив ступеня витягування на зусилля прямо пропорційний та залежить від границь текучості та міцності матеріалу, а саме найменші зусилля витягування спостерігались при деформуванні сплаву низької міцності АМц, а найбільші – при ОТ4 відповідно;

- для сплавів АМг та Д16Т граничний ступінь витягування в межах 1,6...1,64; для АМц 1,6...1,7; для ОТ4 вище за 2,1.

3. У результаті комплексного аналізу геометрії деталей визначено однаковий характер зміни товщини стінки по профілю перерізу для всіх досліджуваних матеріалів та діаметрів заготовок, в той час як похибки деталей у поперечному та поздовжньому напрямку мають дещо різний характер залежно від матеріалу, а саме:

- мінімальні значення товщини в зоні сполучення дно-стінка знаходяться в залежності від марки металу в межах 0,8...0,91 мм для ступеня витягування 1,57 та 0,6...0,82 мм – для 1,75 відповідно;

- найбільшу кривину мають деталі з ОТ4 (16,04 %), а найменшу з АМг (6,7 %); найбільшу овальність мають деталі зі сплаву АМг – 2 %, а найменшу з АМц – 1,4 %, що лежить в межах допуску 0,080 мм (відповідає 10...12-му квалітету точності розміру відносної геометричної точності А).

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

Результати здійснених цифрових та експериментальних досліджень штампування-витягування (див. розд. 3, 4) дають основу для впровадження розроблених методів, моделей та рекомендацій у виробництво. Розглянемо впровадження результатів досліджень на базі технологічного процесу листового штампування вибухом деталі авіаційного двигуна. Такій підхід, на наш погляд, можливий тому, що імпульсні технології отримання деталей с точки зору геометрії будови інструментального штампу (матриці) не відрізняються від традиційних, що дає змогу застосовувати розроблені нами математичні моделі, та моделювання для прогнозування експрес-розрахунку напружено-деформованого стану заготовки та зусилля витягування. Окрім того, інструментальні штампи, які використовуються для розроблення технологічних процесів виготовлення деталей імпульсними методами також мають перетяжні ребра, рифти тощо, що дає змогу ефективно застосовувати розроблені підходи для удосконалення методики розрахунку енергосилових характеристик процесу штампування з урахуванням зони деформації металу на ребрі матриці.

При проектуванні та вдосконаленні технологічних процесів важливе місце займають організаційно-технічні методи підвищення продуктивності та економічної ефективності виробництва [131]. Особливо це стає актуальним при внесенні конструктивних змін як до геометрії, так і до матеріалу деталі. У зв'язку з цим наявність відпрацьованих та надійних алгоритмів проектування технологічних процесів на стадії технічної підготовки виробництва є важливим фактором, що дає змогу підвищити конкурентоспроможність виробництва, за рахунок скорочення часу підготовки виробництва, а також матеріальних ресурсів пов'язаних з відпрацюванням технологічного процесу та якнайшвидшого переведення проєктної технологічної документації до робочої.

Розглянемо застосування запропонованого нами алгоритму проектування

технологічних процесів листового штампування на конкретному прикладі проєктування технологічного процесу виготовлення деталі авіадвигуна – дефлектора. Для наочності оцінимо економічний ефект впливу запропонованого алгоритму на базовий технологічний процес, і на технологічний процес із урахуванням течії металу на перетяжних ребрах.

Відносно висока складність і тривалість підготовчих робіт у виробництві, а також значна вартість штампів потребують ретельного розроблення технологічних процесів і обґрунтованого вибору технічно доцільного та економічно найвигіднішого варіанта технологічного процесу, що відповідає конкретному масштабу виробництва. Навіть незначні подальші зміни в технологічних процесах зазвичай зумовлюють необхідність перероблення штампів або проєктування й виготовлення нових, що потребує багато часу і є досить витратним.

Розроблення технологічних процесів штампування вибухом складається з таких етапів [132, 133]:

1. аналіз конструктивних і технологічних особливостей деталі;
2. визначення форми і розмірів заготовки, а також витрати матеріалу;
3. вибір найраціональнішого технологічного процесу, що забезпечує виготовлення необхідних деталей;
4. визначення типу необхідного устаткування;
5. вибір типу і технологічної схеми штампа;
6. визначення трудомісткості виготовлення штампованих деталей, а також кількості та розряду виробничих робітників.

5.1 Проєктування технологічного процесу виготовлення листової деталі авіадвигуна – дефлектора

5.1.1. Технологічна підготовка виробництва

Спираючись на проведений комплекс теоретичних та експериментальних досліджень нами запропонована методика проєктування і технологічні

рекомендації щодо практичного використання процесів листового штампування деталей складної геометрії з наявністю перетяжних ребер та рифтів, фасонних або рельєфних елементів. Як відомо, головною метою проектування технології є розроблення найбільш ефективного варіанта процесу, продуктом якого є виріб, що відповідає всім вимогам конструкторської документації та виробляється з найменшими трудовитратами. Нами запропоновано алгоритм проектування технологічного процесу (рисунок 5.1), в якому акцентовано увагу саме на дослідженні течії металу в особливо чутливих місцях деталі, що дає змогу на етапі проектування виявити недоліки технічного проекту, та скоротити час переходу до робочого з одночасною економією коштовних матеріалів, які широко використовуються в авіаційній галузі.

Основними перевагами запропонованого підходу є висока оперативність та точність, що є визначальними факторами для конкурентоспроможності продукції в умовах стислих термінів і обмежених матеріальних ресурсів при проектуванні технологічних процесів листового штампування авіаційних деталей на підприємствах галузі в умовах низької серійності виробів та швидкої зміни їхньої номенклатури.

5.1.2. Аналіз конструктивних і технологічних особливостей деталі

Дефлектор являє собою деталь із тонкого листового матеріалу, яка входить до складу турбовального двигуна Д-136, що застосовується на важких транспортних гелікоптерах Мі-26. Дефлектор має форму купола, розташовується у передній частині двигуна і служить для відокремлення масляної порожнини опори від повітряної порожнини, що використовується для обігріву кока (рисунок 5.2). Дефлектор, як типовий приклад даного типу деталей, виготовляється методом штампування і не потребує високої якості поверхні. Точність виготовлення деталі залежить від точності обробки робочої поверхні матриці. Відхилення профілю деталей від заданого профілю матриці залежать від габаритних розмірів деталі. Для осесиметричних днищ із діаметром до 300 мм ці відхилення становлять 0,3...0,8 мм [132].



Рисунок 5.1 – Алгоритм технологічної підготовки виробництва штампування-втягування деталей складної форми

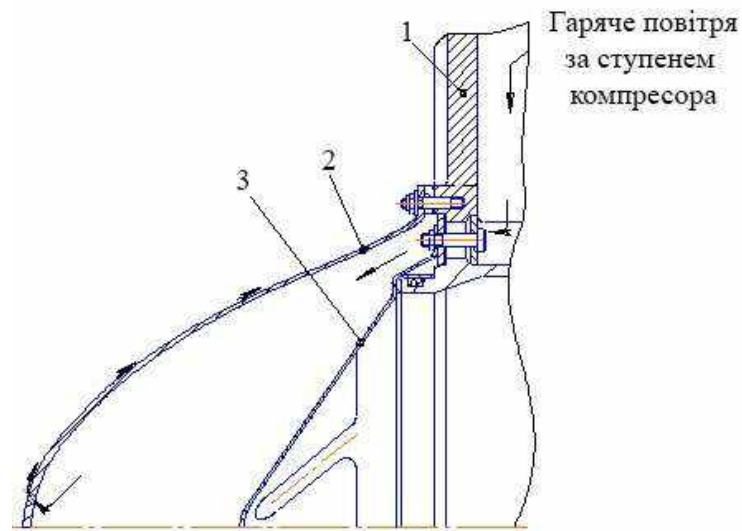


Рисунок 5.2 – Протиобліднювальна система двигуна Д-136:

1 – силовий стояк; 2 – кок; 3 – дефлектор

Робоча температура в області розміщення деталі становить 50°C , середовище є умовно агресивним, тому для виготовлення дефлектора доцільно застосовувати леговану корозійностійку сталь марки X18H10T, яка здатна тривалий час функціонувати в зазначених умовах.

Для забезпечення герметичності протиобліднювальної порожнини дефлектор приєднується до деталі типу диск за допомогою аргонодугового зварювання. На фланці дефлектора виконано вісім отворів «під болти» для його кріплення.

Тиск у масляній порожнині вирівнюється з атмосферним, тоді як тиск у повітряній порожнині обігріву кока є наближеним до тиску, що відбирається з компресора; дефлектор має витримувати цю різницю тиску, для чого на його поверхні передбачені ребра жорсткості.

Деталь відноситься до групи деталей із середнім рівнем технологічності: її конструкція спрощена – для підвищення міцності передбачені ребра жорсткості; з метою уникнення утворення складок і гофрів збільшується площа притиснення, тобто розширюється діаметр фланця, що призводить до додаткових витрат матеріалу; форма деталі – осесиметрична. Після операції штампування-витягування необхідно виконати механічну обробку (свердління отворів у фланці для кріплення дефлектора), що суттєво знижує технологічність.

5.1.3. Обґрунтування вибору матеріалу

Марку матеріалу вибирають відповідно до рекомендацій [132], враховуючи вимоги, що ставляться до деталі: міцність, зносостійкість, жароміцність, корозійна стійкість тощо. Умови роботи деталі (температура нагріву, робоче середовище) обумовили вибір матеріалу – корозійної, жаростійкої сталі аустенітного класу X18H10T ГОСТ 5449-75. У таблицях 5.1 і 5.2 подано хімічний склад і механічні властивості вибраного матеріалу.

Термооброблення листа – загартування при температурі 1020...1100 °С, середовище охолодження – вода, масло або повітря. Інтервал температур деформації у нагрітому стані – 900...1220 °С.

Таблиця 5.1 – Хімічний склад сталі X18H10T

Хімічний елемент	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	S	P	Fe
%	0,01	18	10	1,5	≤ 2	≤ 0,8	≤ 0,02	≤ 0,035	решта

Таблиця 5.2 – Механічні властивості сталі X18H10T при кімнатній температурі

σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	φ , %
510	196	40	55

Характер деформування сталі X18H10T має подібні риси, особливо з огляду на процес листового штампування-витягування, з матеріалами, які використовувались в експериментальних дослідженнях, хоча абсолютні механічні характеристики суттєво різняться. Підтвердженням подібності є:

1. Пластичний режим деформації. Усі вибрані матеріали в умовах штампування деформуються головним чином у пластичній області, тобто після проходження границі текучості, що дозволяє формувати складну геометрію без пружного повернення. Відповідно, їхня поведінка описується моделями пластичності (наприклад, моделі Джонсон-Кук, Barlat, Huber–von Mises).

2. Механізм локалізації деформації. Незалежно від матеріалу, у процесі штампування-витягування граничним фактором є локалізація деформації в окремій зоні, що передусь руйнуванню. Для всіх випадків характерне обмеження формоздатності умовною FLD-кривою.

3. Вплив структури матеріалу. Аустенітна сталь, деформований алюміній та α -титан мають металічну кристалічну решітку (FCC або HCP), де пластична деформація здійснюється головним чином через ковзання й механізми твінінгу (для титану). Всі ці матеріали виявляють структурну чутливість до швидкості деформації та температури, особливо в контексті динамічних процесів штампування.

4. Наявність зміцнення при деформації. Усі матеріали демонструють певний рівень зміцнення під час деформації – у сталі він найвираженіший, в алюмінію слабший, а в титану – помірний, але різко зростає при зниженні температури або збільшенні швидкості деформації. Це зміцнення визначає форму σ – ε кривої та впливає на опір стоншенню в процесі штампування-витягування.

Таким чином, попри відмінності у міцності, щільності, температурній чутливості та анізотропії, механізм пластичної деформації в умовах штампування-витягування має спільний характер. Подібність характеру деформування полягає не у збігові механічних властивостей, а у структурі процесу деформування та умовах втрати стабільності, що дозволяє узагальнювати моделі для оптимізації процесу витягування незалежно від конкретного матеріалу.

5.1.4. Розроблення маршрутної технології виготовлення дефлектора з урахуванням течії металу на перетяжних ребрах

Для побудови процесів штампування слід вирішити основні технологічні питання: установити характер, кількість, послідовність і суміщеність операцій вибухового штампування. Характер операцій визначається в основному

геометричною формою і конфігурацією штампованих деталей, станом їх поверхні, наявністю вирізів або отворів.

У результаті аналізу конструктивних і технологічних особливостей деталі і розгляду різних схем побудови технологічного процесу були розроблені маршрути виготовлення дефлектора (таблиці 5.3, 5.4).

Таблиця 5.3 – Маршрутна технологія виготовлення дефлектора (базовий варіант)

Номер операції	Найменування операції	Найменування устаткування	Тип моделі	Штучний час, хв	Розряд роботи	Кількість робочих
005	Розмітка	Лінійка-рисувалка	—	0,5	4	1
010	Розкрій (лист на смуги і карти)	Гільйотинні ножиці	H415	1,0	4	2
015	Розкрій (карт на мірні заготовки)	Вібраційні ножиці	—	1,0	4	1
020	Слюсарна (зачищення облоїв)	Верстак, полірувальна бабка	—	0,5	4	1
025	Термообробка	Піч	H75 №3	5	5,6	2
030	Підготовка заряду (Відрізати полі-етиленову плівку і липку стрічку. Відважити амоніт і помістити його в плівку. Установити в підготовлений заряд)	Ваги	ВНЦ-2	3,5	5,6	2
035	Підготовка штампа (Вийняти матрицю з корпусу, обдути стисненим повітрям, протерти чистою ганчіркою внутрішню поверхню матриці. Вставити заготовку до упора в дно і притиснути притискним кільцем. Матрицю із заготовкою встановити в корпус. Ущільнити верхній зазор між заготовкою і матрицею мастикою ущільнювача. Надіти трубку вакуумної системи на штуцер, підключити вакуумну систему)	Вибухова камера, штамп	—	10,48	5,6	2

Завершення таблиці 5.3

040	Штапування (Закріпити заряд на пристрої для підвішування заряду і встановити його на заготовку. Опустити штамп на дно басейну. Підірвати заряд. Вимкнути вакуумну систему, підняти штамп з басейну. Витягнути деталь, обдути її стиснутим повітрям і протерти чистою ганчіркою)	Вибухова камера, штамп	—	6,6	5,6	2
045	Підготовка заряду	Ваги	ВНЦ-2	3,5	5,6	2
050	Підготовка штампа	Вибухова камера, штамп	—	10,48	5,6	2
055	Штапування	Вибухова камера, штамп	—	6,6	5,6	2
060	Термообробка	Піч	Н75 №3	5	5,6	2
065	Підготовка заряду	Ваги	ВНЦ-2	3,5	5,6	2
070	Підготовка штампа	Вибухова камера, штамп	—	10,48	5,6	2
075	Штапування	Вибухова камера, штамп	—	6,6	5,6	2
080	Термообробка	Піч	Н75 №3	5	5,6	2
085	Контроль	Стіл	—	1	5,6	2
090	Підготовка заряду	Ваги	ВНЦ-2	3,5	5,6	2
095	Підготовка штампа	Вибухова камера, штамп	—	10,48	5,6	2
100	Калібрування	Вибухова камера, штамп	—	6,6	5,6	2
105	Контроль	Стіл	—	1,5	5,6	2
110	Транспортування	—	—	—	—	—
Штучний час на деталь, хв				102,82		

Таблиця 5.4 – Маршрутна технологія виготовлення дефлектора
(з урахуванням течії металу на перетяжних ребрах)

Номер операції	Найменування операції	Найменування устаткування	Тип моделі	Штучний час, хв	Розряд роботи	Кількість робочих
005	Розмітка	Лінійка-рисувалка	–	0,5	4	1
010	Розкрій (розкроїти лист на смуги)	Гільйотинні ножиці	H415	1,0	4	2
015	Розкрій (вирізати мірні заготовки)	Вібраційні ножиці	–	1,0	4	1
020	Слюсарна (зачищення облоїв)	Верстак, полірувальна бабка	–	0,5	4	1
025	Термообробка	Піч	H75 №3	5,0	5,6	2
030	Підготовка заряду	Ваги	ВНЦ-2	3,0	5,6	2
035	Підготовка штампа (Підняти рухому частину заготовки у крайнє верхнє положення. Нанести мастило на фланцеву частину заготовки і матриці. Установити заготовку на притискне кільце. Опустити верхню частину установки в початкове положення. Установити гільзу із зарядом на зарядний пристрій, зафіксувати гільзу на корпусі. Увімкнути систему вакуумування робочої порожнини матриці. Включити подачу води у вибухову камеру)	Вибуховий прес, вакуумнасос, насос	ВП-1, ВН2-МГ, 4К8	5,5	5,6	2

Завершення таблиці 5.4

040	Штампування (Підірвати заряд. Зняти деталь і встановити нову заготовку. Злити воду. Зняти гіль- зу з корпусу ка- мери, встановити і закріпити на корпусі другу гільзу з зарядом)	Вибуховий прес, насос	ВП-1, 4К8	4,0	5,6	2
045	Підготовка заряду	Ваги	ВНЦ-2	3,0	5,6	2
050	Підготовка штампа	Вибуховий прес, вакуум- насос, насос	ВП-1, Вн2- МГ, 4К8	4,5	5,6	2
055	Штампування	Вибуховий прес, насос	ВП-1, 4К8	4,0	5,6	2
060	Термообробка	Піч	Н75 №3	5,0	5,6	2
065	Підготовка заряду	Ваги	ВНЦ-2	3,0	5,6	2
070	Підготовка штампа	Вибуховий прес, вакуум- насос, насос	ВП-1, Вн2- МГ, 4К8	4,5	5,6	2
075	Штампування	Вибуховий прес, насос	ВП-1, 4К8	4,0	5,6	2
080	Термообробка	Піч	Н75 №3	5,0	5,6	2
085	Контроль	Стіл	—	1,0	5,6	2
090	Підготовка заряду	Ваги	ВНЦ-2	3,0	5,6	2
095	Підготовка штампа	Вибуховий прес, вакуум- насос, насос	ВП-1, Вн2- МГ, 4К8	4,5	5,6	2
100	Калібрування	Вибуховий прес, насос	ВП-1, 4К8	3,0	5,6	2
105	Контроль	Стіл	—	1,5	5,6	2
110	Транспортування	—	—	—	—	—
Штучний час на деталь, хв				63		

5.2. Економічна ефективність

Відомо, що один і той же виріб можна виготовити за різними способами з використанням різних варіантів технологічних процесів. У виробництво слід упроваджувати ті технологічні процеси, які, забезпечуючи необхідну якість виробів і не погіршуючи умови праці, забезпечують при заданих масштабах виробництва якнайменші витрати суспільно необхідної як живої, так і упредметненої праці (у матеріалі, устаткуванні, оснащенні, енергії та ін.). Окрім того, нами запропоновано алгоритм проектування технологічного процесу, використання якого дає змогу скоротити час підготовки виробництва і зменшити вартість оснащення.

Тому при розробленні нових технологічних процесів ще на стадії проведення наукових досліджень потрібен аналіз їхньої економічної ефективності.

Загальний порядок економічного обґрунтування нового технологічного процесу можна подати таким чином [132]:

- вибір об'єкта для порівняння (базовий варіант);
- аналіз особливостей і технологічних відмінностей порівнюваних варіантів;
- вибір показників економічної ефективності;
- розрахунок прийнятих показників;
- аналіз і висновки про ефективність порівнюваних варіантів.

У такій послідовності нижче наведено розрахунок економічної ефективності технологічного процесу виготовлення листових деталей авіаційних складної форми енергією вибуху з урахуванням течії металу на перетяжних ребрах.

У якості бази для порівняння було прийнято технологічний процес виготовлення листової деталі авіаційного двигуна (дефлектора) енергією БВР з використанням стаціонарного басейну і штампа з клиновим притисненням заготовки.

Обидва технологічні процеси організовано на ділянці вибухового штампування, оснащений спеціальною установкою і стаціонарним басейном діаметром 2000 мм. Ділянку обслуговують дві людини. При порівнянні вважаємо, що якість виробів і умови праці в обох варіантах однакові.

5.2.1. Коротка характеристика порівнюваних варіантів

Виготовлення дефлекторів здійснюється на ділянці штампування вибухом, розміщений в закритому приміщенні. За базовим варіантом деталі виготовляють за чотири переходи у стаціонарному басейні за допомогою штампа, оснащеного клиновим притискачем фланця заготовки.

За новим варіантом виготовлення дефлектора також здійснюють за чотири переходи, але при цьому використовують спеціально розроблену установку зі швидкодійним притисненням заготовки та з урахуванням течії металу на перетяжних ребрах. Порівнювані варіанти відрізняються за трудомісткістю, оснащенням і капітальними витратами.

Маршрутну технологію за варіантами наведено у таблицях 5.3, 5.4. Окрім того, нами наведено дані по зменшенню вартості оснащення для кожного варіанта у відсотках з урахуванням запропонованого алгоритму проектування технологічного процесу (таблиця 5.7).

При визначенні трудомісткості витрат використовували матеріали Запорізького машинобудівного об'єднання «Мотор Січ», Південно-турбінного заводу (м. Миколаїв). З урахуванням статистичних даних цих підприємств і за умови роботи в обох випадках по двоє людей трудомісткість за базовим варіантом становить 102,82 люд.-хв, за новим варіантом – 63 люд.-хв. Трудомісткість порівнювальних операцій за базовим і новим варіантами становить відповідно 83,32 і 46 люд.-хв.

5.2.2. Розрахунок та оптимізація календарних термінів виробництва

Зміна організації виконання робіт дає змогу зменшити тривалість

критичного шляху та максимальну кількість виконавців.

Загальна послідовність створення мережного графіка для заданого процесу може бути викладена у такому вигляді:

- запланований процес поділяється на окремі роботи з урахуванням потрібного рівня деталізації, формується перелік робіт, визначаються логічні взаємозв'язки та порядок їх виконання, встановлюються відповідальні виконавці;
- виконується оцінювання трудових витрат та тривалості кожної окремої роботи:

$$t_{ij} = \frac{T_{ij}}{\Phi_{\text{доб}} K_{\text{вн}} K_{\text{одн}}},$$

де t_{ij} – тривалість роботи, дні;

T_{ij} – трудомісткість роботи, люд.-хв;

$\Phi_{\text{доб}}$ – добовий дієний фонд часу, год/доб.;

$K_{\text{вн}}$ – коефіцієнт виконання норм;

$K_{\text{одн}}$ – коефіцієнт одночасно працюючих виконавців;

- створюється мережний графік;
- здійснюється розрахунок параметрів подій і робіт, встановлюються часові резерви та визначається критичний шлях;
- проводиться аналіз та вдосконалення побудованого мережного графіка;
- на основі затвердженої версії мережного графіка визначаються планові завдання виконавцям – обсяг робіт, трудомісткість, строки початку та завершення виконання.

Після встановлення взаємозв'язків між усіма роботами кожній події присвоюється порядковий номер. При цьому кожна робота позначається умовним кодом, що включає номери початкової (і) та кінцевої (j) події, причому повинна виконуватись умова $i < j$.

Основою для визначення всіх часових характеристик мережних графіків є тривалості робіт (T_{ij}). Тривалість кожної роботи може визначатися різними способами: або шляхом обчислення на основі її трудомісткості, або задаватися безпосередньо.

Тривалість виконання роботи може бути подана як єдиним значенням (детерміноване визначення), так і кількома оцінками (ймовірнісне визначення). Наприклад, у процесі оцінювання можуть використовуватись два значення: оптимістичне та песимістичне. У такому випадку потрібно обчислити усереднене значення тривалості роботи.

Подібне подвійне зв'язування окремої роботи із загальним перебігом усього процесу досягається за допомогою розрахунків ранніх та пізніх строків настання подій, а також початку й завершення робіт.

Ранній термін настання події – це найменший можливий термін її виникнення відносно моменту завершення початкової події даного мережного графіка. Він визначається на основі логічної послідовності подій: подія не може настати раніше, ніж завершаться всі попередні події та будуть виконані всі роботи, які на графіку з'єднують її з цими подіями.

Обчислення ранніх термінів настання подій починається з початкової події, для якої умовно приймається значення раннього терміну рівним нулю ($t^p_0 = 0$), тоді $t^p_1 = t^p_0 + t_{01}$ і так далі. Для події, до якої сходяться кілька робіт, серед усіх можливих значень t^p_j обирається найбільше

$$t^p_j = \min_i (t^n_i - T_{ij}).$$

Пізній термін настання події – це максимально можливий момент її здійснення відносно початкової події, за якого термін завершення кінцевої події мережевого графіка не змінюється, тобто не подовжується довжина критичного шляху.

Відповідно, формула для обчислення пізніх термінів настання подій має наступний вигляд

$$t^n_i = \min_j (t^n_j - T_{ij}).$$

Точність розрахунків перевіряється за значенням пізнього терміну початкової події – воно має бути рівним нулю.

Окрему роботу можна розпочати (та завершити) у найраніші, найпізніші або інші допустимі проміжні строки. Під час оптимізації, роботи може бути

розміщено в межах заданого часового інтервалу.

Ранні строки початку та завершення робіт. Кожна подія в мережному графіку одночасно є завершенням для одних робіт і початком для інших. Наступні роботи не можуть розпочатися до того моменту, поки не завершиться подія, з якої вони виходять.

Отже, ранній строк початку роботи відповідає ранньому строку настання події, яка є її початковою (попередньою), тобто $t_{ij}^{pn} = t_i^p$, тоді раннє завершення роботи – $t_{ij}^{pz} = t_{ij}^{pn} + T_{ij}$.

Пізні строки початку та завершення робіт. Пізні строки завершення робіт визначаються на основі пізніх строків настання наступних за ними (кінцевих) подій. Робота не може завершитись пізніше, ніж дозволено пізнім строком здійснення події, яка є її завершальною.

Отже, пізній строк завершення роботи визначається відповідно до пізнього строку здійснення її кінцевої події $t_{ij}^{pz} = t_j^p$, а пізній початок роботи – $t_{ij}^{pn} = t_{ij}^{pz} - T_{ij}$.

Резерви часу. Розрізняють часові резерви подій, шляхів і окремих робіт. Часовий резерв події визначається як різниця між її пізнім та раннім строками настання $R_i = t_i^p - t_i^n$.

Часовий резерв події показує, на скільки максимально можна відкласти її настання без впливу на загальний строк завершення всього комплексу робіт.

У процесі планування виділяють такі види резервів часу для робіт: загальний, частковий першого типу, частковий другого типу, а також вільний резерв.

Загальний резерв показує, наскільки можна подовжити виконання конкретної роботи без зміни строку завершення всієї мережевої події. Загальний резерв часу роботи R_{ij}^n відповідає резерву часу найдовшого з маршрутів, що проходять через цю роботу, і розраховується за відповідною формулою

$$R_{ij}^n = t_j^p - t_i^p - T_{ij} = t_j^p - t_{ij}^{pn} - t_{ij}^{pz}.$$

Частковий резерв першого типу — це частина загального резерву часу, на яку можна подовжити тривалість роботи, не змінюючи при цьому пізній строк

початку її початкової події. Інакше кажучи, це часовий запас, доступний для виконання цієї роботи за умови, що як початкова, так і кінцева події відбудуться у свої пізні терміни. Частковий резерв роботи першого типу

$$R'_{ij} = t_j^n - t_i^n - T_{ij} = t_{ij}^{nn} - t_i^n,$$

$$\text{або } R'_{ij} = R_{ij}^n - R_i.$$

Частковий резерв другого типу – це частина загального резерву часу, на яку дозволено збільшити тривалість роботи без зміни строку настання її завершальної події. Іншими словами, це часовий запас, що допускається при виконанні роботи за умови, що її початкова і кінцева події відбуваються у свої найраніші строки. Частковий резерв другого типу

$$R''_{ij} = t_j^p - t_i^p - T_{ij} = t_j^p - t_{ij}^{po},$$

$$\text{або } R''_{ij} = R_{ij}^n - R_j.$$

Частковий резерв другого типу зручно використовувати для врахування можливих випадкових обставин, що можуть виникнути під час виконання робіт. Найдоцільніше планувати виконання робіт, орієнтуючись на ранні строки їх початку та завершення.

Вільний резерв – це запас часу, що виникає за умови, якщо всі попередні роботи завершуються у пізні строки, а всі наступні починаються у ранні строки

$$R^{cb}_{ij} = t_j^p - t_i^n - T_{ij},$$

$$\text{або } R^{cb}_{ij} = R_{ij}^n - R_i - R_j.$$

У процесі аналізу мережеских графіків доцільно враховувати коефіцієнти напруженості робіт, що належать до некритичних шляхів.

Коефіцієнт напруженості роботи – це співвідношення тривалості найбільш відмінних між собою ділянок шляху, розташованих між одними й тими самими подіями, при цьому одним із них є шлях максимальної тривалості, що проходить через відповідну роботу, а іншим є критичний шлях, який визначається залежністю

$$K_{ij}^H = \frac{T(L_{\max}) - T'(L_{KP})}{T(L_{KP}) - T'(L_{KP})},$$

де K_{ij}^H – коефіцієнт напруженості роботи ij ;

$T(L_{\max})$ – тривалість максимального шляху, що проходить через цю роботу;

$T'(L_{\text{кр}})$ – тривалість відрізка розглядуваного шляху, який співпадає з критичним шляхом;

$T(L_{\text{кр}})$ – тривалість критичного шляху.

Після знаходження критичного шляху та резервів часу мережного графіка необхідно провести всебічний аналіз графіка та вжити заходів щодо його оптимізації. Цей етап у розробленні мережних графіків розкриває основну ідею системи мережного планування та управління. При цьому під мережною оптимізацією графіка розуміють процес покращення організації комплексу робіт з урахуванням термінів виконання та використовуваних ресурсів.

Попередній аналіз мережевого графіка включає:

- оцінювання топології мережі (перевірку правильності побудови мережі відповідно до визначеної черговості робіт, ступеня їх деталізації тощо);
- аналіз часових резервів, класифікацію та групування робіт за величинами резервів і коефіцієнтами напруженості;
- оцінювання потреби в ресурсах (кількість виконавців, витрати тощо), а також ступінь ефективності використання наявних ресурсів.

При проведенні аналізу мережних графіків для їх подальшої оптимізації потрібне ув'язування мережного графіка зі шкалою календарного часу та наявними трудовими ресурсами [134]. Для цього мережний графік перебудовують з урахуванням масштабу часу та доповнюють графіками трудових ресурсів (графіками завантаження).

Звичайний мережний графік має обмеження – відсутність часової шкали, що ускладнює співвіднесення термінів подій і робіт із календарними строками.

У практиці мережного планування та управління використовуються різні методи адаптації мережної моделі до часової шкали: створення мережного графіка безпосередньо в масштабі часу, перетворення мережного графіка на лінійний графік із відображенням зв'язків між роботами, а також побудова лінійної карти мережі.

Графік завантаження – це діаграма, що показує необхідну кількість

виконавців для виконання робіт протягом визначених часових інтервалів.

Аналіз мережного графіка та його подальша оптимізація проводяться з різними цілями:

- зменшення тривалості критичного шляху, тобто часу виконання всього комплексу робіт;
- вирівнювання коефіцієнтів напруженості робіт;
- вирівнювання навантаження на виконавців по календарних періодах, зменшення перевантажень і перерв у роботі.

Для оптимізації процесу виконання робіт застосовуються різноманітні організаційні заходи:

I. без змін у топології мережного графіка:

1. Зменшення тривалості робіт критичних та підкритичних шляхів шляхом залучення додаткових робітників та фінансових ресурсів. При цьому, за умови незмінної трудомісткості роботи, нова тривалість роботи розраховується за відповідною формулою

$$T_{ij}^{\text{нов}} = \frac{T_{ij}^{\text{баз}} N_{ij}^{\text{баз}}}{N_{ij}^{\text{нов}}}.$$

2. Використання часових резервів та трудових ресурсів для некритичних шляхів; при цьому можливі два варіанти:

- переміщення виконавців робіт з некритичних шляхів на роботи критичного шляху; при цьому роботи на некритичних шляхах можуть бути подовжені, але лише в межах доступних резервів часу;
- зміна термінів виконання робіт: початок робіт переноситься з ранніх термінів на проміжні або пізні, що дозволяє вивільнити людей для виконання робіт, які замість паралельних стануть послідовними.

II. З переглядом топології мережного графіка: змінюються технологія та організація виконання робіт, а також склад робіт і їх взаємозв'язки, наприклад:

1. Перерозподіл ресурсів. Включає перенаправлення ресурсів (робітників або устаткування) з менш важливих або некритичних робіт на критичніші етапи проекту, що дозволяє скоротити час виконання робіт.

2. Зміна послідовності робіт. Якщо певні роботи не залежать одна від одної, можна змінити їх порядок виконання для зменшення тривалості проекту, оптимізуючи час використання ресурсів.

3. Аутсорсинг або підрядники: Для швидшого виконання задач можна залучити зовнішніх підрядників або додаткових виконавців, що дозволить зменшити перевантаження на основних співробітників.

4. Паралельне виконання робіт. Якщо це дозволяють умови та ресурси, деякі роботи можуть виконуватися одночасно, а не по черзі, що дозволить зменшити загальний час виконання.

5. Перегляд тривалості робіт. Визначення можливості скорочення часу на виконання робіт за рахунок покращення технології, використання більш ефективних інструментів або методів роботи.

6. Використання гнучких термінів. Якщо є можливість, можна дозволити певні варіанти відкладання робіт без впливу на загальний термін виконання проекту, тим самим зменшуючи перевантаження в деякі періоди.

Ці рішення дозволяють не тільки скоротити загальний час виконання проекту, але й покращити ефективність роботи з ресурсами, зменшити навантаження на команду і уникнути перевантажень.

У нашому випадку, на етапі оптимізації календарних термінів розглядається технологічна підготовка виробництва в аспекті проектування технологічного процесу (ТП) та засобів технологічного оснащення безпосередньо ТП та операційного часу виробництва виробу. У зв'язку зі значним спрощенням завдання розрахунку відпадає безпосередня необхідність у пов'язувати виконання комплексу робіт та розрахунки резерву часу, а безпосередній ефект від упровадження запропонованого алгоритму можна відобразити у вигляді таблиці 5.5.

Додатково проведемо оцінювання економічної ефективності, основними показниками якого є витрати на виготовлення і експлуатацію нової техніки. Ці витрати виражаються двома грошовими показниками:

- капітальні вкладення, пов'язані з упровадженням нової техніки.

Проводять одноразово до початку її експлуатації;

– експлуатаційні витрати, пов'язані з використанням нової техніки у виробництві. Для технологічних процесів ці витрати включають у собівартість продукції, що виготовляється.

Окрім названих показників при аналізі користуватимемося річною економією, що характеризує грошову економію, яку отримає виробництво від упровадження нової техніки, і річним економічним ефектом, що визначається за різницею річних зведених витрат.

Таблиця 5.5 – Результати оптимізації з переглядом топології мережного графіка

Організаційні параметри	До оптимізації	Після оптимізації	Зміна
Тривалість критичного шляху, дні	11	8	–27,3 %
Середня кількість виконавців, люд.	4	4	–
Максимальна кількість виконавців	6	5	–16,7 %

Початкові дані по варіантах наведено в таблицях 5.6, 5.7.

Таблиця 5.6 – Початкові дані для розрахунку

№ п.п.	Найменування	Порівнювані варіанти			
		Одиниці вимірювання	Базовий варіант	Новий варіант	Примітка
1	Трудомісткість виготовлення деталі	люд.-хв	83,32	46	–
2	Кількість робітників	люд	2	2	–
3	Кількість переходів	шт.	4	4	–
4	Розряд робітників (середній)	–	5	5	–
5	Середня тарифна ставка	грн/год	54,54	54,54	–
6	Дійсний річний фонд роботи устаткування	год	3770	3980	–
7	Вага штампів	кг	110	75	–
8	Вантажопідйомність устаткування	т	5	–	–
9	Потужність устаткування	кВт	52	40	–
10	Вартість електроенергії	грн/кВт·год	3,69	3,69	–

За відомою залежністю знаходимо складові технологічної собівартості. При цьому враховуємо тільки відмінні витрати, оскільки однакові на співвідношення варіантів не впливають. У розрахунках ураховано такі витрати: на заробітну платню, амортизацію устаткування, енергію.

Таблиця 5.7 – Початкові дані для розрахунку

№ п.п.	Найменування витрат	Порівнювальні варіанти		
		Базовий варіант	Новий варіант	Примітка
1	Вартість технологічного устаткування	162600	26040	—
2	Вартість оснащення	4440	3060	—
3	Вартість вантажопідйомного устаткування	151206	—	—
Разом (капітальні витрати)		318246	29100	—

При цьому заробітну платню визначали за трудомісткістю і середніми тарифними ставками з урахуванням нарахування на соціальне страхування і додаткову заробітну платню. Норма амортизаційних відрахувань для устаткування прийнята 5,5 %. Вартість електричної енергії – 3,69 грн/кВт·год.

У загальному випадку технологічна собівартість річного обсягу робіт включає велику кількість показників, її визначають за формулою [134, 135]

$$C_{\text{техн}} = (M_{\text{осн}} + C_{\text{з.п}} + C_{\text{ен}} + A_{\text{уст}} + P_{\text{уст}} + I + C_{\text{осн}} + M_{\text{доп}} + A_{\text{буд}} + P_{\text{буд}} + C_{\text{вт}}) \cdot N + A_{\text{сп.обс}}^N + A_{\text{буд}}^N + C_{\text{сп.осн}}^N + C_{\text{нал}}^N, \quad (5.5)$$

де $M_{\text{осн}}$ – витрати на основні матеріали за вирахуванням оборотних відходів, що припадають на одиницю виробу, грн;

$C_{\text{з.п}}$ – заробітна платня виробничих робітників на одиницю виробу (основна і додаткова з урахуванням оподаткування фонду заробітної платні), грн;

$C_{\text{ен}}$ – витрати на електроенергію і енергоносії на одиницю виробу, грн;

$A_{\text{уст}}$ – амортизаційні відрахування від вартості універсального устаткування на одиницю виробу, грн;

$P_{уст}$ – витрати на поточний ремонт і обслуговування устаткування з розрахунку на одиницю виробу, грн;

I – витрати на універсальний інструмент (різальний, мірильний) з розрахунку на одиницю виробу, грн;

$C_{осн}$ – витрати на універсальне оснащення на одиницю виробу, грн;

$M_{доп}$ – витрати на допоміжні матеріали на одиницю виробу, грн;

$A_{буд}$ – амортизаційні відрахування від вартості будівель, площі яких зайняті спеціальним устаткуванням, з розрахунку на одиницю виробу, грн;

$P_{буд}$ – витрати на обслуговування і ремонт будівель з розрахунку на одиницю виробу, грн;

$C_{вт}$ – втрати від браку з розрахунку на одиницю виробу, грн;

$A_{сп.уст}^N$ – річні амортизаційні відрахування від вартості спеціального устаткування, грн;

$A_{буд}^N$ – річні амортизаційні відрахування від вартості будівель, площі яких зайняті спеціальним устаткуванням, грн;

$C_{сп.осн}^N$ – витрати на спеціальне оснащення, що списуються за рік, грн;

$C_{нал}^N$ – річні витрати на налагодження устаткування, грн;

N – річний обсяг робіт, шт.

При розрахунку елементів витрат технологічної собівартості користуватимемося правилами, спрямованими на спрощення розрахунків:

- ураховувати тільки головні витрати, а другорядними – нехтувати;
- ураховувати в калькуляції тільки ті витрати, які відрізняються у порівнюваних варіантах.

Виходячи з цього формула для розрахунку технологічної собівартості одиниці виробу має вигляд

$$C_{техн.вир} = C_{з.п} + A_{уст} + P_{уст} + C_{ен} + \frac{C_{сп.осн}^N}{N}. \quad (5.6)$$

Проведемо розрахунок складових технологічної собівартості [134]:

1. Заробітна платня виробничих робітників, грн:

$$C_{з.п} = I \cdot t(I + \omega_D)(I + \omega_{\text{відрах}}), \quad (5.7)$$

де t – трудомісткість одиниці роботи, люд.-год;

I – погодинна ставка робітника;

ω_D – коефіцієнт додаткової заробітної платні (0,2 – 0,3);

$\omega_{\text{відрах}}$ – коефіцієнт, що ураховує відрахування до фондів пенсійного страхування, зайнятості та соціального страхування (0,25 – 0,35).

2. Амортизаційні відрахування від вартості устаткування, грн:

$$A_{\text{уст}} = \frac{Ц_{\text{уст}}}{\Phi_D \cdot K_3} t \frac{H_a}{100}, \quad (5.8)$$

де Φ_D – дійсний річний фонд роботи устаткування, год;

H_a – норма амортизаційних відрахувань;

$Ц_{\text{уст}}$ – вартість устаткування;

K_3 – коефіцієнт завантаження устаткування (0,8 – 0,9);

t – трудомісткість одиниці роботи, верстато-год.

3. Витрати на поточний ремонт і обслуговування устаткування (укрупнюючий), грн:

$$P_{\text{уст}} = \frac{P_{\text{річ}}}{\Phi_D \cdot K_3} t, \quad (5.9)$$

де $P_{\text{річ}}$ – річні витрати на ремонт при повному завантаженні устаткування, приймаються 3.4 % від вартості устаткування;

Φ_D – дійсний річний фонд роботи устаткування, год;

K_3 – коефіцієнт завантаження устаткування (0,8 – 0,9);

t – трудомісткість одиниці роботи, верстато-год.

4. Витрати на електричну, силову і технологічну енергію, грн:

$$C_{\text{ен}} = N_y \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{ч}} \cdot t \cdot Ц_{\text{ен}}, \quad (5.10)$$

де N_y – установлена потужність електродвигунів устаткування, що використовується на даній операції, кВт;

K_{Π} – коефіцієнт використання електродвигунів за потужністю ($K_{\Pi} = 0,1$);

$K_{\text{ч}}$ – коефіцієнт використання електродвигунів за часом ($K_{\text{ч}} = 0,38$);

t – оперативний час на операцію, верстато-год;

$\text{Ц}_{\text{ен}}$ – вартість електроенергії, грн/кВт·год.

Розрахунок складових елементів технологічної собівартості базового і нового варіантів наведено в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Розрахунок елементів технологічної собівартості

№ п/п	Елементи витрат	Базовий варіант	Новий варіант
1	Заробітна платня виробничих робітників, грн	$C_{\text{з.п}} = 54,54 \cdot \frac{83,32}{60} \times$ $\times 2 (1 + 0,3) \times$ $\times (1 + 0,3) = 255,99$	$C_{\text{з.п}} = 54,54 \cdot \frac{46}{60} \times$ $\times 2 (1 + 0,3) \times$ $\times (1 + 0,3) = 141,33$
2	Амортизаційні відрахування від вартості устаткування, грн	$A_{\text{уст}} = \frac{318246}{3770 \cdot 0,9} \times$ $\times \frac{83,32}{60} \cdot \frac{5,5}{100} = 7,16$	$A_{\text{уст}} = \frac{29100}{3980 \cdot 0,9} \times$ $\times \frac{46}{60} \cdot \frac{5,5}{100} = 0,34$
3	Витрати на поточний ремонт і обслуговування устаткування, грн	$P_{\text{уст}} = \frac{318246 \cdot 0,03}{3770 \cdot 0,9} \times$ $\times \frac{83,32}{60} = 3,91$	$P_{\text{уст}} = \frac{29100 \cdot 0,03}{3980 \cdot 0,9} \times$ $\times \frac{46}{60} = 0,19$
4	Витрати на електричну, силову і технологічну енергію, грн	$C_{\text{ен}} = 52 \cdot 0,1 \cdot 0,38 \times$ $\times \frac{83,32}{60} \cdot 3,69 = 10,13$	$C_{\text{ен}} = 40 \cdot 0,1 \cdot 0,38 \times$ $\times \frac{46}{60} \cdot 3,69 = 4,30$
Технологічна собівартість, грн/дет		299,39	161,46

Наведений розрахунок технологічної собівартості показав, що для деталі, яка розглядається, при реальних для дрібносерійного виробництва випусках виробів перевагу слід віддавати новому варіанту.

Різниця технологічних собівартостей річної програми між базовим і новим варіантами дає умовно-річну економію від упровадження нової техніки у

виробництво [127]:

$$C_{y.p} = (C_{т.б} - C_{т.н}) N, \quad (5.11)$$

де $C_{т.б}$. – технологічна собівартість базового варіанта;

$C_{т.н}$. – технологічна собівартість нового варіанта;

N – програма випуску (річний обсяг робіт):

$N = 200$ дет./рік.

$$C_{y.p} = (299,39 - 161,46) 200 = 27586 \text{ грн.}$$

Узагальнюючим показником ефективності нової техніки є зведені витрати, в яких поєднано поточні витрати і капітальні вкладення

$$\Pi = CN + E_n K, \quad (5.12)$$

де C – собівартість одиниці роботи;

K – капітальні вкладення;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Різниця зведених витрат за порівнюваними варіантами дає річний економічний ефект [135]

$$E = \Pi_b - \Pi_n = (C_b - C_n)N + E_n (K_b - K_n), \quad (5.13)$$

$$E = (299,39 - 161,46)200 + 0,15(318246 - 29100) = 70957,9 \text{ грн.}$$

Техніко-економічні показники порівнюваних варіантів наведено у таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Техніко-економічні показники

№ п.п.	Найменування показника	Порівнювані варіанти		
		Базовий варіант	Новий варіант	Примітка
1	Капітальні витрати, тис. грн	318246	29100	–
2	Потужність устаткування, кВт	52	40	–
3	Трудомісткість виготовлення, люд.-год	1,389	0,766	–
4	Кількість робітників, люд.	2	2	–
5	Технологічна собівартість, грн	299,39	161,46	Однієї деталі
6	Річна економія, грн	27586		$N = 200$ шт.
7	Річний економічний ефект, грн	70957,9		$N = 200$ шт.

Таким чином, при програмі випуску двісті деталей за рік річна економія становить 27586 грн, річний економічний ефект – 70957,9 грн. Наведений розрахунок показав, що для розглянутої деталі новий варіант має значні переваги порівняно з базовим унаслідок зниження капітальних витрат, трудомісткості, вартості оснащення, витрат на підйомно-транспортне устаткування. Разом з тим можливості використання нового варіанта обмежені габаритами деталей (500...600 мм), що виготовляються, устаткування потребує серйозних теоретичних і експериментальних досліджень щодо зовнішнього навантаження, міцнісних параметрів, конструктивних рішень.

Дані, наведені у розділі 5, опубліковано у роботах [1, 6, 8, 12] зі списку публікацій Додатка А.

5.3 Висновки

1. Запропоновано алгоритм технологічної підготовки штампування-виготовлення деталей складної геометрії, що дає додаткову можливість виявляти недоліки запропонованого технологічного процесу та скоротити час на проєктування та виготовлення штампового оснащення, а відповідно і терміни підготовки дрібносерійного виробництва деталей складної форми з листа.

2. З використанням запропонованого алгоритму удосконалено маршрутну технологію виготовлення дефлектора двигуна Д-136 з плоскої заготовки з урахуванням течії металу на перетяжних ребрах.

3. Виконано розрахунок економічної ефективності, який показав, що новий технологічний процес має значні переваги порівняно з базовим, а саме зменшення тривалості критичного шляху на 27,3 %, а річний економічний ефект при програмі випуску двісті деталей за рік становить 70957,9 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розглянуто шляхи інтенсифікації та методи підвищення ефективності процесу штампування-витягування авіаційних деталей складної форми. Сформульовано задачу поліпшення методики розрахунку кінематичних та енергосилових характеристик процесу деформування листових заготовок.

2. Досліджено кінематику процесу течії металу на ребрах матриць при штампуванні-витягуванні, що дає змогу досліджувати картину течії металу у просторі, визначати його напружено-деформований стан та прогнозувати виникнення руйнувань при формоутворенні деталей складної форми.

3. Доведено функціональний зв'язок між повною роботою деформації і параметрами режиму штампування-витягування авіаційних деталей складної форми з урахуванням кінематики течії металу на ребрах матриць.

4. Результати цифрового моделювання штампування-витягування у симуляції методом скінченних елементів демонструють відповідність як інженерним оцінкам, отриманим з використанням теоретичної моделі, так і натурному експерименту. Зокрема, максимальні напруження, зареєстровані в момент руйнування, та момент повного відділення матеріалу відрізняються від теоретичних розрахунків не більш ніж на 5...10 % для всіх досліджуваних матеріалів.

5. Проведено дослідження впливу ступеня витягування та марки матеріалу заготовки на якість одержуваних деталей та зусилля штампування-витягування, що дало змогу визначити таке:

– вплив ступеня витягування на зусилля прямо пропорційний та залежить від границь текучості та міцності матеріалу, а саме найменші зусилля витягування спостерігались при деформуванні сплаву низької міцності АМц, а найбільші – при ОТ4 відповідно;

– для сплавів АМг та Д16Т граничний ступінь витягування в межах 1,6...1,64; для АМц 1,6...1,7; для ОТ4 вище за 2,1.

6. У результаті комплексного аналізу геометрії деталей визначено

однаковий характер зміни товщини стінки по профілю перерізу для всіх досліджуваних матеріалів та діаметрів заготовок, в той час як похибки деталей у поперечному та поздовжньому напрямках мають дещо різний характер залежно від матеріалу, а саме:

- мінімальні значення товщини в зоні сполучення дно-стінка знаходяться залежно від марки металу в межах 0,8...0,91 мм для ступеня витягування 1,57, та 0,6...0,82 мм – для 1,75 відповідно;

- найбільшу кривину мають деталі з ОТ4 (16,04 %), а найменшу – з АМг (6,7 %); найбільшу овальність мають деталі зі сплаву АМг – 2 %, а найменшу – з АМц – 1,4%, що лежить в межах допуску 0,080 мм (відповідає 10...12-му квалітету точності розміру відносної геометричної точності А).

7. Розроблено рекомендації щодо впровадження удосконаленої технології штампування-витягування деталей складної форми з алюмінієвих та титанових сплавів. Запропоновано алгоритм технологічної підготовки штампування-витягування деталей складної геометрії, що дає додаткову можливість виявляти недоліки запропонованого технологічного процесу та скоротити час на проєктування та виготовлення штампового оснащення, а відповідно і терміни підготовки дрібносерійного виробництва деталей складної форми з листа.

8. З використанням запропонованого алгоритму технологічної підготовки штампування-витягування деталей складної геометрії удосконалено маршрутну технологію виготовлення дефлектора двигуна Д-136 та виконано розрахунок економічної ефективності, який показав, що новий технологічний процес має значні переваги порівняно з базовим, а саме зменшення тривалості критичного шляху на 27,3 %, а річний економічний ефект при програмі випуску двісті деталей за рік становить 70957,9 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chigirinsky V. V., Kresanov Y. S., Volokitina I. E. Experimental study of energy-power parameters of billet rolling of compressor blades of aircraft engines // *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2023. Vol. 45, iss. 4. 467–479. DOI: 10.15407/mfint.45.04.0467.
2. Chigirinsky V. V., Kresanov Y. S., Volokitina I. E. Study of kinematic and deformation parameters of rolling of compressor blade Workpieces // *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2023. Vol. 45, iss. 5. P. 631–646. DOI: 10.15407/mfint.45.05.0631.
3. Denissova A. I., Volokitin A. V., Volokitina I. E. Prospects of Application and Global Significance of Graphene // *Progress in Physics of Metals*. 2022. Vol. 23, iss. 2. P. 268–295. DOI: 10.15407/ufm.23.02.268.
4. Ab initio modeling of decomposition in iron based alloys / O. I. Gorbatov, Yu. N. Gornostyrev, P. A. Korzhavyi, A. V. Ruban // *Physics of Metals and Metallography*. 2016. Vol. 117. P. 1293–1327. DOI: 10.1134/S0031918X16130019.
5. High-efficiency forming processes for complex thin-walled titanium alloys components: state-of-the-art and perspectives / K. Wang, L. Wang, K. Zheng, He. Zhubin, D. Politis, G. Liu, S. Yuan // *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2020. Vol. 2, iss. 3. P. 032001. DOI: 10.1088/2631-7990/ab949b.
6. Design and development of progressive tool for mold tag / V. Deepak, O. Abhilash, Y. P. Ravitej, Veerachari, L. Abhinandan // *Advanced Trends in Mechanical and Aerospace Engineering. ATMA-2019 : conf. proc., Bangalore, India, 7–9 Nov. 2019. [S. l.], 2021. (AIP Conference Proceedings ; vol. 2316)*. DOI: 10.1063/5.0038385.
7. Zuev L. B., Barannikova S. A., Lunev A. G. Elastoplastic Strain Invariant of Metals // *Progress in Physics of Metals*. 2018. Vol. 19, iss. 4. P. 379–417. DOI: 10.15407/ufm.19.04.379.
8. Milman Yu. V., Chugunova, S. I, Goncharova I. V., Golubenko A. A. Plasticity of Materials Determined by the Indentation Method // *Progress in Physics of Metals*.

2018. Vol. 19, iss. 3. P. 271–308. DOI: 10.15407/ufm.19.03.271.

9. Modelling and Simulation of the Plastic Flows in Metal / M. O. Kurin, O. O. Horbachov, A. V. Onopchenko, T. V. Loza // *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2022. Vol. 44, iss. 6. P. 785–806. DOI: 10.15407/mfint.44.06.0785

10. Кабатов А. А. Технология алмазного выравнивания деталей авиационных двигателей и агрегатов : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т». Харьков, 2014. 183 с.

11. Onopchenko A. V., Kurin M. O., Shyrokyi Yu. V. Ensuring Quality of Stamping Sheet Aviation Parts // *Progress in Physics of Metals*. 2024. Vol. 25, iss. 2. P. 320–363. DOI: 10.15407/ufm.25.02.320.

12. Холодне листове штампування : навч. посіб. / М. М. Убизький, О. В. Кулик, А. Г. Фесенко, Д. І. Шевчук. – Дніпропетровськ : РВВ ДНУ, 2008. 124 с.

13. Разработка групповых технологических процессов при изготовлении листовых деталей импульсной обработкой с использованием компьютерных информационных технологий / В. В. Третьяк, О. В. Мананков, Д. А. Овчар, А. В. Онопченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 60 (3). С. 17–20.

14. Третьяк В. В., Онопченко А. В. Проектування технологічних процесів імпульсного оброблення методами синтезу та адресації : навч. посіб. до дипл. проектування. Харків : ХАІ, 2020. 72 с.

15. Uncontained turbine rotor failure: Bombardier Inc. BD-500-1A10 (C series CS100), C-FBCS : Aviation Investigation Report A14Q0068 (Quebec: International (Mirabel) Airport: 2014) [Electronic resource] // Transportation Safety Board of Canada : websites. URL: <https://publications.gc.ca/site/eng/9.819750/publication.htm> (25.02.2025).

16. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов. Харьков : ХГУ, 1958. 187 с.

17. Yang X., Wang B., Zhou J. Numerical and experimental study on formability of TC4 alloy in a novel multi-layer sheet hot stamping process // *The International*

Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 5/6. P. 1233–1247. DOI: 10.1007/s00170-020-05802-z.

18. Investigation of interfacial heat transfer characterization for TC4 alloy in triple-layer sheet hot stamping process / J. Zhou, X. Yang, B. Wang, M. Yanhong // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 9/10. P. 5779–5792. DOI: 10.1007/s00170-022-09570-w.

19. Mori Ki., Abe Y., Miyazawa S. Warm stamping of ultra-high strength steel sheets at comparatively low temperatures using rapid resistance heating // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 108. P. 3885–3891. DOI: 10.1007/s00170-020-05642-x.

20. Influence of Thermal Deformation Parameters on Mechanical Properties and Microstructure Evolution of AA7075 Aluminum Alloy during Hot Stamping-Quenching Process / H. Li, Z. Hu, L. Hua, Q. Sun // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 2019. Vol. 71. P. 4778–4788. DOI: 10.1007/s11837-019-03846-5.

21. An experimental and numerical study of feasibility of a novel technology to manufacture hot stamping dies with pre-constructed tube network / K. Zheng, C. Tong, Y. Li, Z. Kolozsvari, D. Trevor // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 111. P. 2919–2937. DOI: 10.1007/s00170-020-06280-z.

22. Mechanical Properties and Microstructure of High-Strength Steel Controlled by Hot Stamping Process / H. Ou, X. Zhang, J. Xu, G. Li, J. Cui // Journal of Materials Engineering and Performance. 2018. Vol. 27. P. 4025–4035. DOI: 10.1007/s11665-018-3290-1.

23. Komodromos A., Kolpak F., Tekkaya A. E. Manufacturing of Integrated Cooling Channels by Directed Energy Deposition for Hot Stamping Tools with Ball Burnished Surfaces // Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. 2022. Vol. 167. P. 428–435. DOI: 10.1007/s00501-022-01264-w.

24. Besong L. I., Buhl J., Bambach M. Increasing formability in hole-flanging through the use of punch rotation based on temperature and strain rate dependent

forming limit curves // International Journal of Material Forming. 2022. Vol. 15, iss. 37. P. 1–21. DOI: 10.1007/s12289-022-01684-6.

25. Xiao W., Wang B., Zheng K. An experimental and numerical investigation on the formability of AA7075 sheet in hot stamping condition // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 92. P. 3299–3309. DOI: 10.1007/s00170-017-0419-6.

26. Investigation of Residual Stresses Induced by Incremental Sheet Forming and Stamping in Aluminum Alloys / D. Kumar, L. Zhigang, S. Jirathearanat, A. Kumar // Journal of Materials Engineering and Performance. 2023. Vol. 32. P. 2950–2962. DOI: 10.1007/s11665-022-07304-3.

27. Analysis of Material Work Hardening and Fracture Strains for Sheet Metal Stamping Processes / S. Golovashchenko, S. Zdravkovic, N. Reinberg, S. Nasheralahkami, W. Zhou // Forming the Future : Proc. of the 13th Intern. Conf. on the Technology of Plasticity. Cham : Springer, 2021. P. 2777–2788. DOI: 10.1007/978-3-030-75381-8_231.

28. Surface and interior residual stress analysis of a deep-drawn 1180-MPa class ultra-high strength steel sheet with scratch marks / T. Matsuno, Y. Ochiai, Y. Okitsu, M. Iga, A. Kohri, T. Mikami // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 116. P. 2873–2884. DOI: 10.1007/s00170-021-07675-2.

29. Tan C. J., Phoo Y. H. Eliminating Delayed Cracks in Deep-Drawn SUS304 Cups Under Wider Range and Lower Magnitude of Blank Holding Forces Using Tin Coated Die // Research Square. 2021. P. 1–21. DOI: 10.21203/rs.3.rs-515980/v1.

30. Investigation of forming defects in 5A06 aluminum alloy cold stamping of thin-walled shell with corner / J. Wang, J. Liu, B. Wang, X. Huang, B. Wang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. Vol. 125. P. 2581–2592. DOI: 10.1007/s00170-023-10883-7.

31. An analysis of the forming speed variation with relation to deep drawing depth of steel DP 600 sheets / M. Madi, M. V. Junior, R. A. Filho, P. V. Prestes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 99. P. 2417–2424. DOI: 10.1007/s00170-018-2635-0.

32. Hardening of A6111-T4 Aluminum Alloy at Large Strains and Its Effect on Sheet Forming Operations / S. Golovashchenko, N. Reinberg, A. Hassannejadasl, D. Green // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. Vol. 28. P. 2465–2476. DOI: 10.1007/s11665-019-03977-5.
33. Theoretical and Numerical Investigation of the Limit Strain of a 5754-O Aluminum Alloy Sheet Considering the Influence of the Hardening Law / B. Ma, C. Yang, X. Wu, L. Zhan // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023. Vol. 32, iss. 22. P. 10115–10127. DOI: 10.1007/s11665-023-07849-x.
34. Jia B., Wang W. Shape accuracy analysis of multi-point forming process for sheet metal under normal full constrained conditions // *International Journal of Material Forming*. 2018. Vol. 11. P. 491–501. DOI: 10.1007/s12289-017-1359-2.
35. Martinez A., Miguel V., Coello J. A new approach to evaluate bending forces for deep-drawing operations of a TRIP700 +EBT steel sheet // *International Journal of Material Forming*. 2018. Vol. 11. P. 619–641. DOI: 10.1007/s12289-017-1377-0.
36. Study on High-Temperature Mechanical Properties and Forming Limit Diagram of 7075 Aluminum Alloy Sheet in Hot Stamping / R. Gu, Q. Liu, S. Chen, W. Wurong, W. Xicheng // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. Vol. 28. P. 7259–7272. DOI: 10.1007/s11665-019-04436-x.
37. Novel hydromechanical reverse drawing method for thin-walled aluminum alloy sheet forming / D. You, D. Cai, Y. Wang, F. Zhou, Z. Ruan // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 120. P. 3741–3756. DOI: 10.1007/s00170-022-08936-4.
38. Structural design of stamping die of advanced high-strength steel part for automobile based on topology optimization with variable density method / T. Xu, H. Wu, F. Xue, J. Guo, J. Ran, F. Gong // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 121. P. 8115–8125. DOI: 10.1007/s00170-022-09898-3.
39. Numerical and experimental investigations of the hot stamping process for complex aircraft skin parts composed of TA32 high-temperature titanium alloy using an Arrhenius-type constitutive model / C. Chen, M. Chen, L. Xie, Z. Gong, J. Ye // *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 103. P. 807–817. DOI: 10.1007/s00170-019-03568-7.

40. Prediction and Experiment of Fracture Behavior in Hot Press Forming of a TA32 Titanium Alloy Rolled Sheet / R. Fan, M. Chen, Y. Wu, L. Xie // Metals. 2018. Vol. 8, iss. 12. P. 1–14. DOI: 10.3390/met8120985.

41. Numerically Efficient Sheet Metal Forming Simulations in Consideration of Tool Deformation / Y. J. Song, I. S. Oh, S. H. Hwang, H. Choi, M. Lee, H. J. Kim // International Journal of Automotive Technology. 2021. Vol. 22. P. 69–79. DOI: 10.1007/s12239-021-0008-4.

42. Wear and fatigue characteristics of new stamping die material for ultra-high-strength steel sheet / I. K. Lee, M. S. Jeong, S. K. Lee, Y. Cho, J. Lee, P. Seo, D. Ko, K. Lee, B. Kim // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2015. Vol. 16. P. 2377–2382. DOI: 10.1007/s12541-015-0306-8.

43. Structural topology optimization of a stamping die made from high-strength steel sheet metal based on load mapping / H. Wang, H. Xie, Q. Liu, Y. Shen, P. Wang, L. Zhao // Struct Multidisc Optim. 2018. Vol. 58, iss. 2. P. 769–784. DOI: 10.1007/s00158-018-1899-1.

44. Experimental and numerical investigation of flexible bulging process of aluminum AA1050-H14 sheet metal with soft tools / L. Belhassen, S. Koubaa, M. Wali, F. Dammak // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 103. P. 4837–4846. DOI: 10.1007/s00170-019-04066-6.

45. Optimized shape calibration process using flexible dies for annular and rectangular corners with small radius of thin-walled shell components / Yq. Shu, N. Xiang, Hr. Wang, Pi. Wang, T. Huang, Z. Wang, Y. Lin, J. Guo // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 121. P. 5473–5490. DOI: 10.1007/s00170-022-09759-z.

46. Dry Deep Drawing of Aluminum and the Influence of Sheet Metal Roughness / F. Flegler, P. Groche, T. Abraham, G. Bruer // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 2020. Vol. 72. P. 2511–2516. DOI: 10.1007/s11837-020-04173-w.

47. Polajnar M., Coga L., Kalin M. Base lubricants for green stamping: The effects

of their structure and viscosity on tribological performance // *Friction*. 2023. Vol. 1. P. 1741–1754. DOI: 10.1007/s40544-022-0706-6.

48. Jeong H. S., Park S. H., Cho W. S. Influence of Process Variables on the Stamping Formability of Aluminum Wing Nose Rib // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019. Vol. 20. P. 497–510. DOI: 10.1007/s12541-019-00112-1.

49. An experimental study on effect of process parameters in deep drawing using Taguchi technique / A. C. S. Reddy, S. Rajesham, P. R. Reddy, T. P. Kumar, J. Goverdhan // *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2015. Vol. 7, iss. 1. P. 21–32. DOI: dx.doi.org/10.4314/ijest.v7i1.3.

50. Influence of process parameters and defect analysis in hot deep drawing process of aluminum alloy AA6082 / Wy. Ma, By. Wang, Q. Rong, J. Yang, J. Zhang, J. Cent // *Journal of Central South University*. 2022. Vol. 29. P. 883–897. DOI: 10.1007/s11771-022-4984-y.

51. Возможности использования компьютерных систем для проектирования импульсных технологий / В. В. Третьяк, Ю. А. Невешкин, А. В. Онопченко, И. В. Скорченко // *Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали II Всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф., Суми, 17–20 квіт. 2012 р. Суми, 2012. Ч. 1. С. 34–35.*

52. Elsherbiny M. Thinning and Spring back Prediction of Sheet Metal in the Deep Drawing Process. // *Materials and Design*. 2014. Vol. 53. P. 797–808. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.078.

53. Evaluation of stamping lubricants using the deep drawing test / H. Kim, J. Sung, R. Sivakumar, T. Altan // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. Vol. 47, iss. 14. P. 2120–2132. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.04.014.

54. Experimental Assessment of Friction Coefficient in Deep Drawing and Its Verification by Numerical Simulation / E. Evin, N. Daneshjo, A. Mareš, M. Tomáš, K. Petrovčiková // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, iss. 6. P. 1–13. 2756. DOI: 10.3390/app11062756.

55. The effect of the die radius profile accuracy on wear in sheet metal stamping /

M. P. Pereira, M. Weiss, B. F. Rolfe, T. B. Hilditch // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2013. Vol. 66. P. 44–53
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.11.001.

56. Numerical investigation of the effect of punch corner radius and die shoulder radius on the flange earrings for AA1050 and AA1100 aluminum alloys in cylindrical deep drawing process / K. Bouchaâla, M. F. Ghanameh, M. Faqir, M. Mada, E. Essadiqi // Heliyon. 2021. Vol. 7, iss. 4. P. 1–8.
DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06662.

57. Effect on the product finish in deep drawing process due to supremacy of punch force / V. Brathikan, S. Jayabalu, S. Gideon, P. Prashanth, K. Scidarth // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2272 : International Conference on Design, Manufacturing and Materials Engineering. ICDMME-2021, Coimbatore, India, 10–11 March 2022. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/2272/1/012015.

58. Özdilli Ö., Erdin E. Hitit University Hitit University Comparison of Common Deep Drawing Steel Sheets in terms of Blank Holder Force and Friction Conditions // International Journal of Automotive Science and Technology. 2018. Vol. 2 (3). P. 36–41. DOI: 10.30939/ijastech..463629.

59. Effect of Die Design Parameters on Thinning of Sheet Metal in the Deep Drawing Process / H. Zein, M. El-Sherbiny, M. Abd-Rabou, M. El Shazly // American Journal of Mechanical Engineering. 2013. Vol. 1, iss. 2. P. 20–29.
DOI: 10.12691/ajme-1-2-1.

60. Influence of various blank diameter in deep drawing / V. M. Brathikan, N. Sangeetha, B. Sangeethkumar, K. Scidarth // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 68, iss. 6. P. 1995–1999. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.281.

61. Savas V., Secgin O. A new type of deep drawing die design and experimental results // Materials and Design. 2007. Vol. 28, iss. 4. P. 1330–1333.
DOI: 10.1016/j.matdes.2006.01.004.

62. Mahesh P. M., Bagal N. S., Kedar B. Calculation of Deep Drawing Force in CR4 Metal Forming // International Journal of Advanced Research in Science & Technology. 2020. Vol. 8, iss. 2. P. 44–50. DOI: XX.082020/IJARST.

63. The Stress State of the Workpiece at the Radius of Matrix Rounding During Drawing. Considering the Bending Moment / R. Arhat, R. Puzyr, V. Shchetynin, R. Levchenko, O. Pedun // *Advanced Manufacturing Processes III: sel. papers from the 3rd Grabchenko's Intern. conf., Sept. 7–10, 2021, Odessa, Ukraine*. Cham : Springer, 2021. P. 479–488. DOI: 10.1007/978-3-030-91327-4_47.
64. Thor M., Sause M. G. R. Hinterhlzl R. M. Mechanisms of Origin and Classification of Out-of-Plane Fiber Waviness in Composite Materials – A Review // *Journal of Composites Science*. 2020. Vol. 4, iss. 3. P. 130. DOI: 10.3390/jcs4030130.
65. Experimental and numerical investigation of fiber metal laminate forming behavior using a variable blank holder force / H. Blala, L. Lang, S. Khan, S. Alexandrov // *Production Engineering*. 2020. Vol. 14. P. 509–522. DOI: 10.1007/s11740-020-00974-9.
66. Development of experimental and theoretical forming limit diagrams for warm forming of austenitic stainless steel 316 / S. M. Hussainia, G. Krishnaa, A. K. Guptaa, S. K. Singh // *Journal of Manufacturing Processes*. 2015. Vol. 18. P. 151–158. DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.03.005.
67. Zein H., Irfan, O. M. Optimization and Mapping of the Deep Drawing Force Considering Friction Combination // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, iss. 19. P. 1–19. DOI: 10.3390/app11199235.
68. Онопченко А. В. Чисельне моделювання процесу холодного штампування у LS-DYNA // *Авіація, промисловість, суспільство : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., Кременчук, 18 трав. 2023 р. / Харків. нац. ун-т внутрішніх справ [та ін.]*. Харків, 2023. С. 279–281.
69. Определение коэффициента использования металла при штамповке и методы его увеличения / Н. Ф. Савченко, В. В. Третьяк, А. В. Онопченко, С. А. Стадник // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2014. № 117 (10). С. 11–14.
70. Bachmann J, Hidalgo C, Bricout S. Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector – A life cycle assessment review // *Science China Technological Sciences*. 2017. Vol. 60. P. 1301–1317.

DOI: 10.1007/s11431-016-9094-y.

71. Онопченко А. В. Структура дослідження енергосилових параметрів процесів листового штампування // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». Харків, 2021. Вип. 91. С. 49–54. DOI: 10.32620/oikit.2021.91.03.
72. Алексеев Ю. Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием. Харьков : ХГУ, 1969. 107 с.
73. Изготовление заготовок деталей газотурбинных двигателей из титановых сплавов : монография / А. И. Долматов и др. Запорожье : ОАО «Мотор Сич». 2000. 290 с.
74. Kurin M. O. Determination of the Boundaries of Plastic Zone of Metal Deformation During the Cutting // Progress in Physics of Metals. 2020. Vol. 21, iss 2. P. 249–273.
75. ДСТУ ГОСТ 2.308:2013. Єдина система конструкторської документації. Зазначення допусків форми та розміщення поверхонь. Чинний від 01.09.2014. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015.
76. ДСТУ 2413-94. Основні норми взаємозамінності. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення. Чинний від 01.01.1995. Київ : Держстандарт України, 1994.
77. ДСТУ 2925-94. Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення. Чинний від 01.01.1996. Київ : Держстандарт України, 1995.
78. Closed-loop control of product properties in metal forming / J. M. Allwood, S. R. Duncan, J. Cao, P. Groche, G. Hirt, B. Kinsey, T. Kuboki, M. Liewald, A. Sterzing, A. E. Tekkaya // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2016. Vol. 65, iss. 2. P. 573–596. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.002.
79. Topa A., Shah Q. Failure Prediction in Bulk Metal Forming Process // International Journal of Manufacturing Engineering. 2014. Vol. 2014. P. 1–15. DOI: 10.1155/2014/385065.
80. Bulk Metal Forming Processes in Manufacturing / E. Ghassemali, X. Song, M. Zarinejad, D. Atsushi, M. J. Tan // Handbook of Manufacturing Engineering and

Technology. London : Springer, 2013. P. 1–50. DOI: 10.1007/978-1-4471-4976-7_44-31.

81. Cui X., Guo J. Identification of the optimum cutting parameters in intermittent hard turning with specific cutting energy, damage equivalent stress, and surface roughness considered // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 96. P. 4281–4293. DOI: 10.1007/s00170-018-1885-1.

82. Machining Parameters and Toolpath Productivity Optimization Using a Factorial Design and Fit Regression Model in Face Milling and Drilling Operations / G. M. Minquiz, V. Borja, M. López-Parra, A. C. Ramírez-Reivich, L. Ruiz-Huerta, R. C. Ambrosio Lázaro, A. Shigeru Yamamoto Sánchez, H. Vazquez-Leal, M. E. Pavon-Solana, J. Flores Méndez // Mathematical Problems in Engineering. 2020. № 1. P. 1–13. DOI: 10.1155/2020/8718597.

83. Identification of technological parameters when machining Ni-alloys by monolithic ceramic milling tool / M. Šajgalík, A. Czán, M. Drbúl, I. Daniš, M. Mikloš, O. Babík, R. Joch // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 14. P. 51–57. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.11.006.

84. Comparison the Effect of MQL, Wet and Dry Turning on Surface Topography, Cylindricity Tolerance and Sustainability / S. Masoudi, M. J. Esfahani, F. Jafarian, S. A. Mirsoleiman // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing–Green Technology. 2019. Vol. 10. P. 9–21. DOI: 10.1007/s40684-019-00042-3.

85. Lee Y. J., Wang H. Current understanding of surface effects in microcutting // Materials & Design. 2020. Vol. 192. P. 108688. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108688.

86. Effect of machining parameters on the surface finish of a metal matrix composite under dry cutting conditions / B. Boswell, M. N. Islam, I. J. Davies, A. Pramanik // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2017. Vol. 231, iss. 6. P. 913–923. DOI: 10.1177/0954405415583776.

87. A study of the interaction between coolant jet nozzle flow and the airflow around a grinding wheel in cylindrical grinding / C. Baumgart, J. Radziwill, F. Kustera, K. Wegener // 16th CIRP Conference on Modelling of Machining

- Operations : conf. paper., Cluny, France, June 15–16, 2017. . Amsterdam : Elsevier, 2017. P. 517–522. (Procedia CIRP ; vol. 58). DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.261.
88. Jamshidi, H., Budak, E. Grinding temperature modeling based on a time dependent heat source // 8th CIRP Conference on High Performance Cutting. HPC'2018 : conf. paper, Budapest, Hungary, 25–27 June 2018. Amsterdam : Elsevier, 2018. P. 299–302. (Procedia CIRP ; vol. 77). DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.020.
89. Zaborowski T., Ochendusko, R. Grinding burns in the technological surface of the gear teeth of the cylindrical gears // *Mechanik*. 2017. Vol. 10. P. 135–139. DOI: 10.17814/mechanik.2017.10.135.
90. Larshin V., Lishchenko N. Adaptive profile gear grinding boosts productivity of this operation on the CNC machine tools // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*. DSMIE'2018: proc. of the Intern. conf., Sumy, Ukraine, June 12–15. 2019. Cham : Springer, 2018. P. 79–88.
91. Badger J., Murphy S., O'Donnell G. E. Acoustic emission in dressing of grinding wheels: AE intensity, dressing energy, and quantification of dressing sharpness and increase in diamond wear-flat size // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018. Vol. 125. P. 11–19. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2017.11.007.
92. Jin Y., Ping L. Temperature distributions in form grinding of involute gears // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 88. P. 2609–2620. DOI:10.1007/s00170-016-8971-z.
93. Кабатов А. А. Структура исследования энергосиловых параметров процесса алмазного выглаживания // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т»*. Харків, 2013. Вып. 1 (73). С. 67–72.
94. Rodríguez J. M., Carbonell J. M., Jonsén P. Numerical Methods for the Modelling of Chip Formation // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 27. P. 387–412. DOI: 10.1007/s11831-018-09313-9.
95. Ben Li. A review of tool wear estimation using theoretical analysis and numerical simulation technologies // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2012. Vol. 35. P. 143–151. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.05.006.

96. Some insights on the modelling of chip formation and its morphology during metal cutting operations / T. Mabrouki, C. Courbon, Y. Zhang, J. Rech, D. Nélías, M. Asad, H. Hamdi, S. Belhadi, F. // *Comptes Rendus Mécanique*. 2016. Vol. 344, iss. 4/5. P. 335–354. DOI: 10.1016/j.crme.2016.02.003.
97. Baoyu Wang, Modelling and experimental research in hot precision forging of shaft gear / B. Wang, Z. Li, M. Zheng, B. Zuo, J. Lin, C. Zhu // 4th International Conference on New Forming Technology. ICNFT'2015 : proceeding. [S. l.], 2015. P. 1–6. (MATEC Web of Conferences ; vol. 21). DOI: 10.1051/mateconf/20152102005.
98. Grain Flow in Forgings [Electronic resource] // Milwaukee Forge : website. URL: <https://www.milwaukeeforge.com/grain-flowin-forgings/> (дата звернення: 25.02.2025).
99. Cold Forging vs. Hot Forging—Considerations, Benefits and Drawbacks [Electronic resource] // Farinia group : website. URL: <https://www.farinia.com/blog/cold-forging-vs-hot-forging-considerationsbenefits-and-drawbacks> (дата звернення: 25.02.2025).
100. Mahesh N. S. Forging and Extrusion Processes [Electronic resource] : [presentation]. URL: https://asremavad.com/wp-content/uploads/2019/08/Forging-and-Extrusion-Processes_www.asremavad.com_.pdf (дата звернення: 25.02.2025).
101. Lewandowski M., Stupkiewicz S. Size effects in wedge indentation predicted by a gradient-enhanced crystal-plasticity model // *International journal of plasticity*. 2018. Vol. 109. P. 54–78. DOI: 10.1016/j.ijplas.2018.05.008.
102. Kurin M. O. Hyperbolae method analysis of a wedge flow at free cutting // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, iss. 7. P. 859–876. DOI: 10.15407/mfint.40.07.0859.
103. Investigation the plastic flows in the metal stamping-drawing process at the die corner / A. V. Onopchenko, M. O. Kurin, Y. V. Shyrokyi, O. O. Horbachov // *Acta Polytechnica*. 2024. Vol. 64, iss. 4. P. 385–397. DOI: 10.14311/AP.2024.64.0385.
104. Optimal conditions for deformation of stamping-drawing process from aviation materials / A. Onopchenko, O. Horbachov, V. Sorokin, Y. Dudukalov, M. Kurin //

Advanced Manufacturing Processes IV : sel. papers from the 4rd Grabchenko's Intern. conf., Sept. 6–9, 2022, Odessa, Ukraine. Cham : Springer, 2022. P. 109–118. DOI: 10.1007/978-3-031-16651-8_11.

105. Plastic flow and anisotropy of a low-carbon steel over a range of strain-rates / Y. P. Korkolis, B. R. Mitchell, M. R. Locke, B. L. Kinsey // International Journal of Impact Engineering. 2018. Vol. 121. P. 157–171. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.07.015.

106. Determination of the instantaneous strain rate during small punch testing of 316L stainless steel / D. Sánchez-Ávila, R. Barea, E. Martínez, L. Portolés, Fernando Carreño // International Journal of Mechanical Sciences. 2018. Vol. 149. P. 93–100. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.09.042.

107. Luyen T. T., Tong V. C., Nguyen D. T. A simulation and experimental study on the deep drawing process of SPCC sheet using the graphical method // Alexandria Engineering Journal. 2021. Vol. 61, iss. 3. P. 2472–248. DOI: 10.1016/j.aej.2021.07.009.

108. Prediction of earing defect and deep drawing behavior of commercially pure titanium sheets using CPB06 anisotropy yield theory / A Singh, S. Basak, L. Prakash P. S., G. G. Roy, M. N. Jha, M. Mascarenhas, S. K. Panda // Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 33. P. 256–267. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.05.003.

109. Mahmoud M., Bay F., Muñoz D. P. An efficient multiphysics solid shell based finite element approach for modeling thin sheet metal forming processes // Finite Elements in Analysis and Design. 2022. Vol. 198. P. 103645. DOI: 10.1016/j.finel.2021.103645.

110. Study of factors affecting springback in sheet metal forming and deep drawing process / R. K. Lal, V. K. Choubey, J. P. Dwivedi, S. Kumar // Materials Today Proceedings. 2018. Vol. 5, iss. 2. P. 4353–4358. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.002.

111. ДСТУ 2464-94.01. Розрахунки та випробування на міцність. Методи визначення еквівалентних і допустимих напружень від статичного навантаження. З Поправкою (ІПС № 5-94). Чинний від 01.01.1995. Київ, 1994. 14 с.

112. Лоза Т. В. Попередня підготовка поверхневого шару і забезпечення якості детонаційних покриттів деталей авіаційних двигунів : дис. ... канд. техн. наук : / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». Харків, 2021. 200 с.
113. Recent advances in modelling of metal machining processes / P. J. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davie, I. S. Jawahir // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2013. Vol. 62, iss. 2. P. 695–718. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.006.
114. 100th Anniversary Issue of the Manufacturing Engineering Division Paper. A Review of Advances in Modeling of Conventional Machining Processes: From Merchant to the Present / S. Melkote, S. Liang, T.Özel, I. S. Jawahir, D. A. Stephenson, B. Wang // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2022. Vol. 144, iss. 11. P. 1–22. DOI: 10.1115/1.4053522.
115. Size effect in true mode II fracturing of rocks: Theory and experiment / B. Bahador, S. Ghouli, M. Nejati, M. Reza Ayatollahi, T. Driesner // European Journal of Mechanics. A/Solids. 2022. Vol. 94. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2022.104593.
116. Finite Element Simplifications and Simulation Reliability in Single Point Incremental Forming / T. Pepelnjak, L. Sevšek, O. Lužanin, M. Milutinović // Materials. 2022. Vol. 15, iss. 10. P. 1–22. DOI: 10.3390/ma15103707.
117. Graça A., Vincze G. A. Short Review on the Finite Element Method for Asymmetric Rolling Processes // Metals. 2021. Vol. 11, iss. 5. P. 1–22. DOI: 10.3390/met11050762.
118. Chitchyan R., Bird C. Theory as a source of software and system requirements // Requirements Engineering. 2022. Vol. 27. P. 375–398. DOI: 10.1007/s00766-022-00380-w6.
119. Simulation Modelling of the Process of Birds Fly into the Turbojet Aircraft Engine Fan to Determine Most Dangerous Cases in Terms of Blade Strength / G. Martynenko, N. Smetankina, V. Martynenko, V. Merculov, M. Kostin // IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology KhPIWeek'2022 : conf. proc., 3–7 Oct. 2022, Kharkiv, Ukraine. [S. l.], 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916474.

120. Lean Maintenance 4.0: implementation for aviation industry / Y. Korchagin, I. Deniskin, O. Pocebneva, O. Vasilyeva // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. P. 1521–1533. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.164.
121. Hallquist J. O. LS-DYNA : theory manual / Livermore Software Technology Corporation. 2006. 970 p. URL: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/ls-dyna_theory_manua_2006.pdf (дата звернення: 25.02.2025).
122. Ansys GRANTA Selector software [Electronic resource]. URL: www.ansys.com/materials (дата звернення 25.02.2025).
123. Prakash V., Kumar D. R. Numerical simulation of warm deep drawing incorporating strain rate effect in sheet material properties // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 18. Pt 7. P. 2595–2602. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.118.
124. Numerical simulation of sheet metal forming of an Al-Mg alloy incorporating plane strain properties in the yield criterion / V. Prakash, R K. Digavalli, M. Lenzen, H. Hagenah, M. Merklein // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Pt. B: Journal of Engineering Manufacture. 2022. Vol. 238. iss. 3. DOI: 10.1177/09544054221135388.
125. Characterization of wear and friction between tool steel and aluminum alloys in sheet forming at room temperature / J. Domitner, Z. Silvayeh, A. S. Sabet, K. I. Öksüz, L. Pelcastre, J. Hardell // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 64. P. 774–784. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.02.007.
126. Gontarz A., Dziubińska A., Okoń Ł. Determination of friction coefficients at elevated temperatures for some Al, mg and Ti alloys // Archives of Metallurgy and Materials. 2011. Vol. 56, iss. 2. P. 379–384. DOI: 10.2478/v10172-011-0040-x.
127. Sharma M. D., Sehga R. Dry sliding friction and wear behaviour of titanium alloy (Ti-6Al-4V) // Tribology Online. 2012. Vol. 7, iss. 2. P. 87–95. DOI: 10.2474/trol.7.87.
128. Investigation of sheet-titanium drawability [Electronic resource] / J. Adamus, P. Lacki, M. Motyka, K. Kubiak // Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. Ti'2011 : Beijing, China, 19–24 June. [S.l.], 2011. P. 337–340.

URL: <https://www.researchgate.net/publication/26027603> (дата звернення: 25.02.2025).

129. Fang N., Jawahir I. S. Analytical predictions and experimental validation of cutting force ratio, chip thickness, and chip back-flow angle in restricted contact machining using the universal slip-line model // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002. Vol. 42, iss. 6. P. 681–694. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00006-8.

130. Algorithm for model validation: Theory and applications / D. Sornette, A. B. Davis, K. Ide, J. R. Kamm // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2007. Vol. 104, iss. 16. P. 6562–6567. DOI: 10.1073/pnas.0611677104.

131. Третьяк В. В., Онопченко А. В. Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства листовых деталей для импульсных технологий // Проблемы створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф., Харків, 22–23 квіт. 2009 р. Харків, 2009. С. 78.

132. Конструкторсько-технологічна підготовка виробництва листових деталей методами імпульсного штампування : навч. посіб. до дипл. проектування / А. М. Гринченко, В. В. Третьяк, Ю. В. Лемешко, А. В. Онопченко. Харків : ХАІ, 2018. 80 с.

133. Третьяк В. В. Федорова А. С., Онопченко А. В. Математична модель конструкції і технології виготовлення дефлектора за допомогою імпульсних технологій / В. В. Третьяк, // XXIV Міжнародний конгрес двигунобудівників : тези доп., Миколаїв, Коблево, 2–7 верес. 2019 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» [та ін.]. Харків, 2019. С. 107.

134. Гавва В. Н. Экономическая оценка инженерных решений : учеб. пособие. Харьков : ХАИ, 1999. 35 с.

135. Економіка підприємства. Практикум : / О. В. Калініченко, О. Д. Плотник. Київ : Кондор, 2012. 600 с.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковано основні наукові результати дисертаційної роботи.

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

1. Онопченко А. В. Конструкторсько-технологічна підготовка виробництва дефлектора з використанням імпульсних технологій // Авиационно-космическая техника и технология. 2019. № 7 (159). С. 145–150. DOI: 10.32620/aktt.2019.7.21.

Фахове видання

2. Онопченко А. В. Структура дослідження енергосилових параметрів процесів листового штампування // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». Харків, 2021. Вип. 91. С. 49–54. DOI: 10.32620/oikit.2021.91.03. **Фахове видання, «Б»**

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав за напрямом:

3. Investigation the plastic flows in the metal stamping-drawing process at the die corner / A. V. Onopchenko, M. O. Kurin, Y. V. Shyrokyi, O. O. Horbachov // Acta Polytechnica. 2024. Vol. 64, iss. 4. P. 385–397. DOI: 10.14311/AP.2024.64.0385. **Czech Republic, Web of Science, SCOPUS, Q 4.**

Статті у наукових періодичних виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у зарубіжних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

4. Modelling and Simulation of the Plastic Flows in Metal / M. O. Kurin, O. O. Horbachov, A. V. Onopchenko, T. V. Loza // Metallophysics and Advanced Technologies = Металофізика та новітні технології. 2022. Vol. 44, iss. 6. P. 785–806. DOI: 10.15407/mfint.44.06.0785. **Фахове видання, «А», Web of Science, SCOPUS, Q 3.**

5. Onopchenko A. V., Kurin M. O., Shyrokyi Yu. V. Ensuring Quality of

Stamping Sheet Aviation Parts // Progress in Physics of Metals = Успіхи фізики металів. 2024. Vol. 25, iss. 2. P. 320–363. DOI: 10.15407/ufm.25.02.320. **Фахове видання, «А», Web of Science, SCOPUS, Q 2.**

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Третьяк В. В., Онопченко А. В. Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства листовых деталей для импульсных технологий // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф., Харків, 22–23 квіт. 2009 р. Харків, 2009. С. 78.

7. Возможности использования компьютерных систем для проектирования импульсных технологий / В. В. Третьяк, Ю. А. Невешкин, А. В. Онопченко, И. В. Скорченко // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали II Всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф., Суми, 17–20 квіт. 2012 р. Суми, 2012. Ч. 1. С. 34–35.

8. Третьяк В. В. Федорова А. С., Онопченко А. В. Математична модель конструкції і технології виготовлення дефлектора за допомогою імпульсних технологій / В. В. Третьяк, // XXIV Міжнародний конгрес двигунобудівників : тези доп., Миколаїв, Коблево, 2–7 верес. 2019 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» [та ін.]. Харків, 2019. С. 107.

9. Optimal Conditions for Deformation of Stamping-Drawing Process from Aviation Materials / A. Onopchenko, O. Horbachov, V. Sorokin, Y. Dudukalov, M. Kurin // Advanced Manufacturing Processes IV : sel. papers from the 4rd Grabchenko's international conf., Sept. 6–9, 2022, Odessa, Ukraine. Cham : Springer, 2022. P. 109–118. (Lecture Notes in Mechanical Engineering, ISSN 2195-4356). DOI: 10.1007/978-3-031-16651-8_11. **SCOPUS, Q 4**

10. Онопченко А. В. Чисельне моделювання процесу холодного штампування у LS-DYNA // Авіація, промисловість, суспільство : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., Кременчук, 18 трав. 2023 р. / Харків. нац. ун-т внутрішніх справ [та ін.]. Харків, 2023. С. 279–281.

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації:

11. Разработка групповых технологических процессов при изготовлении листовых деталей импульсной обработкой с использованием компьютерных информационных технологий / В. В. Третьяк, О. В. Мананков, Д. А. Овчар, А. В. Онопченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 60 (3).

С. 17–20. **Фахове видання**

12. Определение коэффициента использования металла при штамповке и методы его увеличения / Н. Ф. Савченко, В. В. Третьяк, А. В. Онопченко, С. А. Стадник // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2014. № 117 (10).

С. 11–14. **Фахове видання**

ДОДАТОК Б
СПЕЦИФІКАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ

№1. Ti Grade 4, sheet, unknown strain rate

Material information

Material family	Metals and alloys
Material category	Titanium Alloys
Material	Ti Grade 4
UNS number	R50700
Werkstoff-number	3.7065
State	Solid
Product form	sheet
Descriptor	unknown strain rate

Test information

Export analysis type	Elastic, Elastic & Plastic, Plastic, Weight
Test temperature	-180 - 870 °C

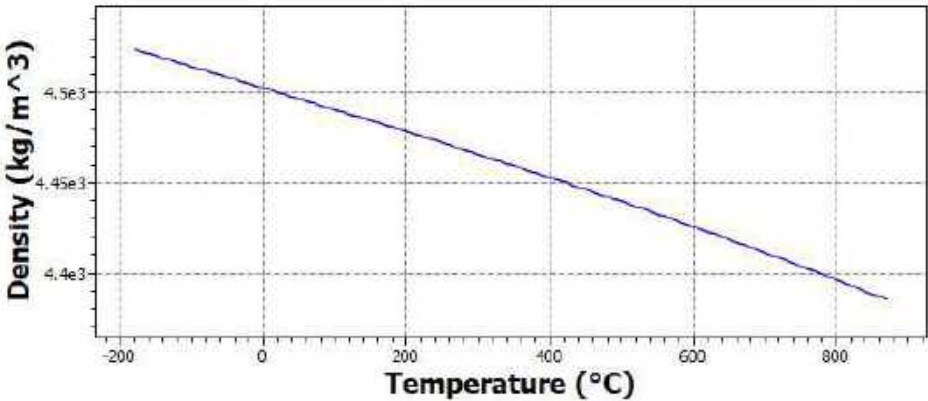
Composition - elements

Base element	Ti (titanium)		
Al (aluminum)	0.241	-	0.426 %
C (carbon)	0	-	0.1 %
Fe (iron)	0	-	0.5 %
H (hydrogen)	10e-6	-	12.5e-3 %
N (nitrogen)	0	-	50e-3 %
O (oxygen)	0	-	0.4 %
Ti (titanium)	* 98.2	-	99.5 %
V (vanadium)	0.255	-	0.272 %

Physical properties

Density	* 4.5e3	kg/m^3
---------	---------	--------

Parameters: Temperature = 23°C



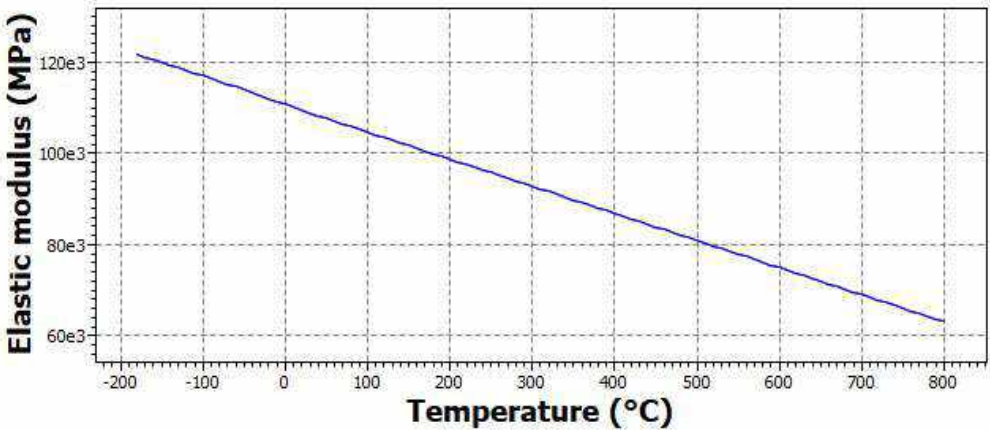
Reference
MIL-HDBK-5H, 1 Dec 1998 p5-9

Note
5 error, calculated from the mean coefficient of thermal expansion
Copied from 'Ti Grade 4, All conditions'

Mechanical properties

Elastic modulus	* 109e3	MPa
-----------------	---------	-----

Parameters: Temperature = 23°C



Note

values below 25°C (77°F) were decreased by 2% to match the high temperature values, same data as for elemental titanium
Copied from 'Ti Grade 4, All conditions'

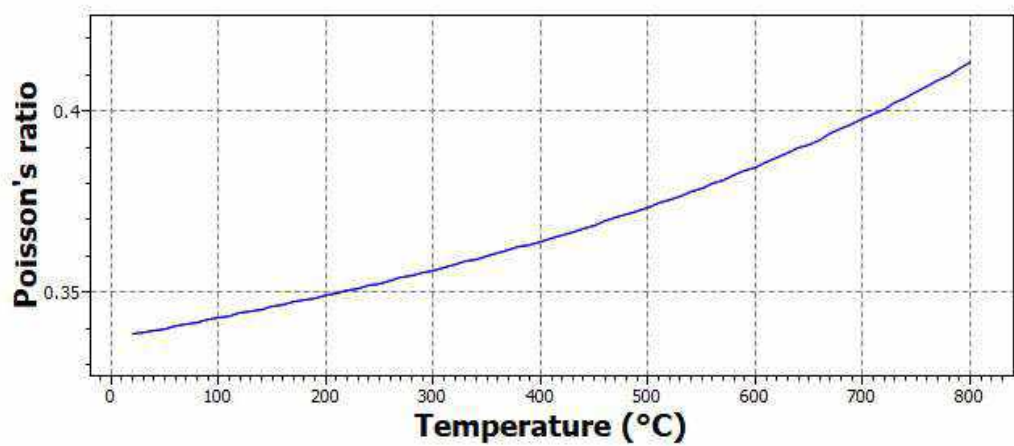
Reference

O.N. Senkov, M. Dubois and J.J. Jonas, Metallurgical Transactions A, v27A, No. 12, p3963 (1996) and W. Koester, Zeitschrift fuer Metallkunde, v39, No. 1, p1 (1948)

Poisson's ratio

* 0.338 - 0.338

Parameters: Temperature = 23°C



Reference

O.N. Senkov, M. Dubois and J.J. Jonas, Metallurgical Transactions A, v27A, No. 12, p3963 (1996)

Note

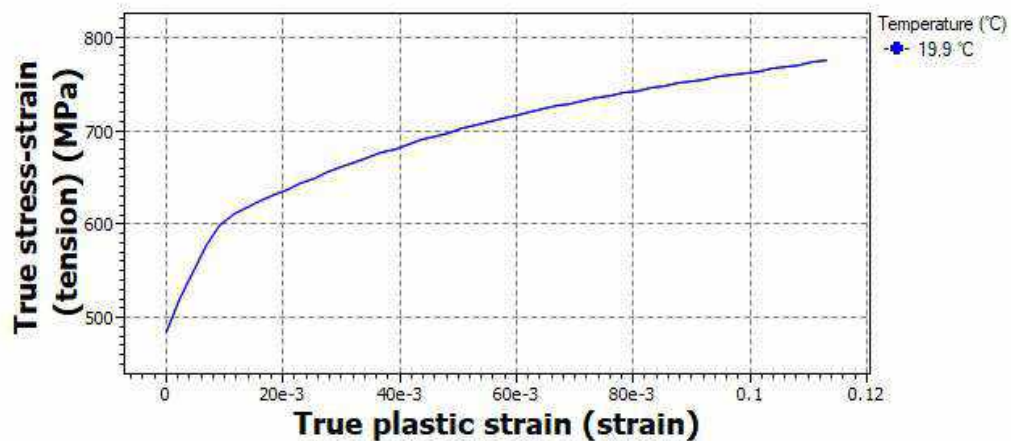
calculated from E and G, errors may be large, same data as for elemental titanium
Copied from 'Ti Grade 4, All conditions'

True stress-strain (tension)

Out Of Range

MPa

Parameters: True plastic strain = 0strain, Temperature = 23°C



Composition

bal. Ti, 0.05 N max, 0.1 C max, (0.01-0.0125) H max, 0.4 O max, 0.5 Fe max (wt%)

Note

tested at 20°C (68°F) at an unknown strain rate in tension, sheet, same data given for longitudinal and transverse directions, Allvac 70, beta transus 949°C (1740°F), Allvac, Inc., values were converted from engineering stress-strain to true stress-strain using the relationship in the README.html file, initial yield calculated as 0.2% offset

Strain rate

0

Reference

MIL-HDBK-5H, 1 Dec 1998 p5-14

Links

Global Metals similar alloys

MaterialUniverse

Values marked * are estimates.

Data compiled by JAHM Software and licensed for distribution by Granta Design Limited, a subsidiary of Ansys, Inc.

Ansys Granta provides no warranty for this data.

No2 Aluminum, 2014, T4

General information

Ansys Name

Aluminum alloy, wrought, 2014, T4

Designation

Aluminum, 2014, T4, wrought

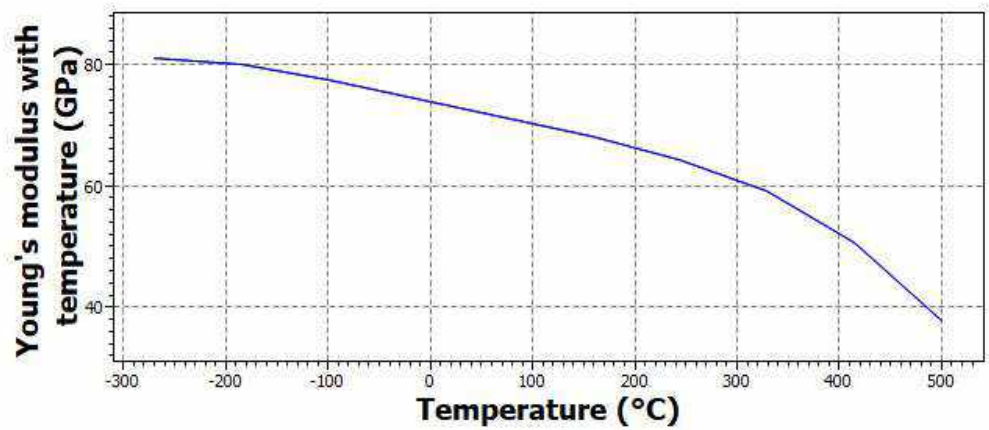
Condition

T4 (Solution heat-treated and naturally aged to a substantially stable condition)

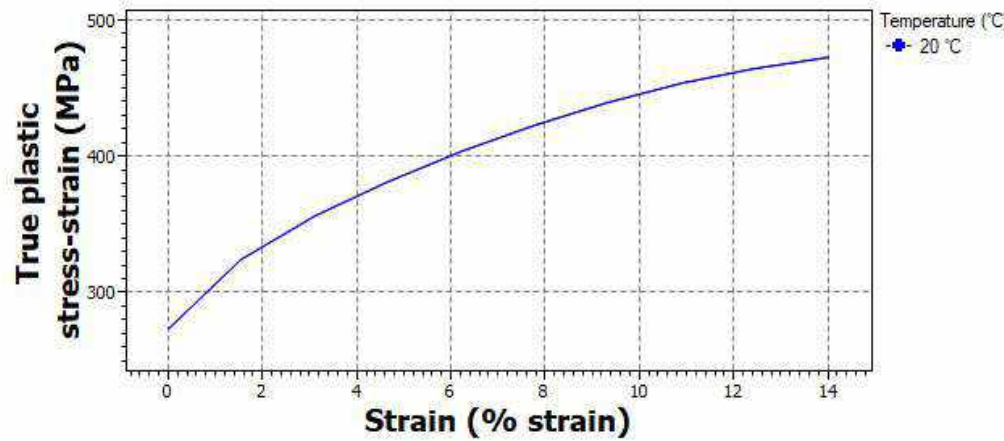
UNS number

A92014

EN name	EN AW-2014 (EN AW-Al Cu4SiMg)		
EN number	3.1255		
Typical uses	Heavy duty forgings, power shovel bails, airplane fittings, structural members, weapons manufacture, sports equipment.		
Included in Materials Data for Simulation	True		
Composition overview			
Compositional summary	Al90-95 / Cu3.9-5 / Si0.5-1.2 / Mn0.4-1.2 / Mg0.2-0.8 (impurities: Fe<0.7, Zn<0.25, Ti<0.15, Cr<0.1, Other<0.15)		
Material family	Metal (non-ferrous)		
Base material	Al (Aluminum)		
Composition detail (metals, ceramics and glasses)			
Al (aluminum)	* 90.4	- 95	%
Cr (chromium)	0	- 0.1	%
Cu (copper)	3.9	- 5	%
Fe (iron)	0	- 0.7	%
Mg (magnesium)	0.2	- 0.8	%
Mn (manganese)	0.4	- 1.2	%
Si (silicon)	0.5	- 1.2	%
Ti (titanium)	0	- 0.15	%
Zn (zinc)	0	- 0.25	%
Other	0	- 0.15	%
Price			
Price	* 59.9	- 66.7	UAH/kg
Price per unit volume	* 166e3	- 189e3	UAH/m^3
Physical properties			
Density	2.77e3	- 2.83e3	kg/m^3
Mechanical properties			
Young's modulus	73	- 77	GPa
Young's modulus with temperature	73	- 73	GPa
Parameters: Temperature = 23°C			

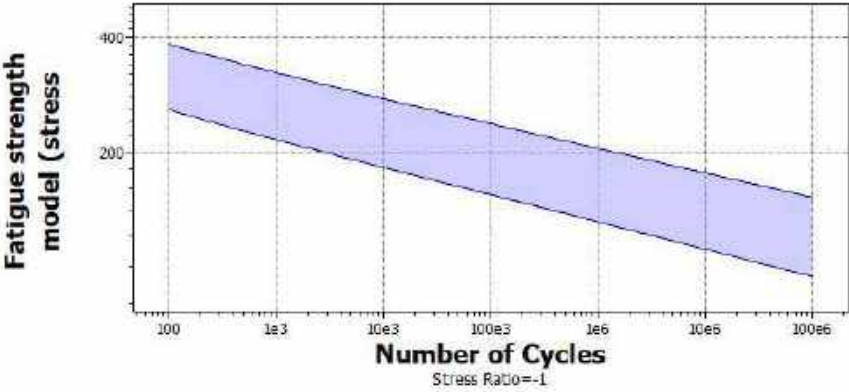


Specific stiffness	26	- 27.6	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	220	- 320	MPa
Tensile strength	350	- 440	MPa
Specific strength	78.6	- 114	kN.m/kg
Elongation	6	- 18	% strain
Tangent modulus	1.16e3	-	MPa
True plastic stress-strain	Out Of Range	-	MPa
Parameters: Strain = 1% strain, Temperature = 23°C			



Compressive strength	* 220	- 320	MPa
Flexural modulus	* 73	- 77	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	220	- 320	MPa
Shear modulus	26	- 28	GPa
Bulk modulus	68	- 75	GPa
Poisson's ratio	0.325	- 0.335	
Shape factor	26		
Hardness - Vickers	114	- 126	HV
Hardness - Brinell	97	- 121	HB
Elastic stored energy (springs)	332	- 663	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	133	- 147	MPa
Fatigue strength model (stress amplitude)	111	- 176	MPa

Parameters: Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 10e6cycles



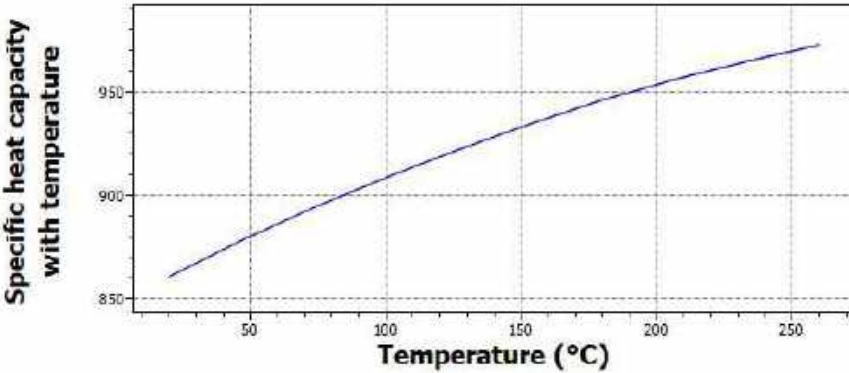
Impact & fracture properties

Fracture toughness	* 35	- 38	MPa.m ^{0.5}
Toughness (G)	16.3	- 19.3	kJ/m ²
Ductility index	0.153	- 0.187	μm

Thermal properties

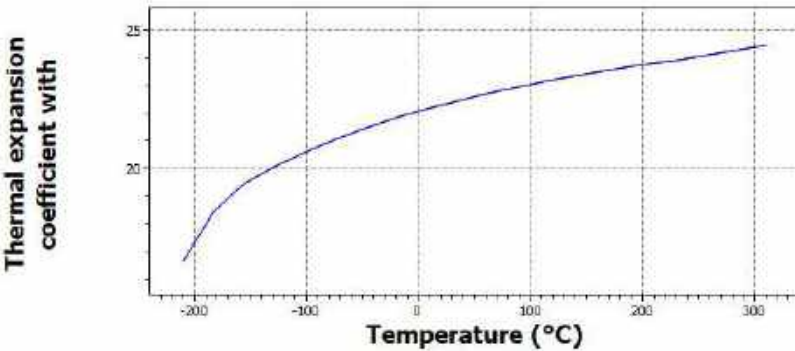
Melting point	505	- 640	°C
Maximum service temperature	170	- 200	°C
Minimum service temperature	-273		°C
Thermal conductivity	131	- 137	W/m.°C
Specific heat capacity	858	- 893	J/kg.°C
Specific heat capacity with temperature	863	- 863	J/kg.°C

Parameters: Temperature = 23°C



Thermal expansion coefficient	22.2	- 23.4	μstrain/°C
Thermal expansion coefficient with temperature	22.3	- 22.3	μstrain/°C

Parameters: Temperature = 23°C



Thermal shock resistance	128	-	188	°C
Thermal distortion resistance	* 5.68	-	6.08	MW/m
Latent heat of fusion	384	-	393	kJ/kg
Electrical properties				
Electrical resistivity	5	-	5.2	μohm.cm
Electrical conductivity	33.2	-	34.5	%IACS
Galvanic potential	* -0.77	-	-0.69	V
Magnetic properties				
Magnetic type	Non-magnetic			
Optical, aesthetic and acoustic properties				
Transparency	Opaque			
Softness to touch	10.1	-	10.4	
Warmth to touch	5.43	-	5.61	
Acoustic velocity	5.1e3	-	5.25e3	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 100e-6	-	2e-3	
Healthcare & food				
Food contact	Yes			
Guidance for MRI Safety	Low Risk for Potential Interaction			
Restricted substances risk indicators				
RoHS 2 (EU) compliant grades?	True			
REACH Candidate List indicator (0-1, 1 = high risk)	0			
SIN List indicator (0-1, 1 = high risk)	0			
Critical materials risk				
Abundance risk level	Medium			
Highest risk elements				
Copper				
Sourcing and geopolitical risk level	High			
Highest risk elements				
Magnesium				
Environmental country risk level	Very high			
Highest risk elements				
Magnesium				
Price volatility risk level	Medium			
Highest risk elements				
Silicon				
Conflict material risk level	Caution			
Highest risk elements				
Copper				
Processing properties				
Metal casting	Unsuitable			
Metal cold forming	Limited use			
Metal hot forming	Acceptable			
Metal press forming	Acceptable			
Metal deep drawing	Limited use			
Machining speed	54.9			m/min
Weldability	Excellent			
Notes				
Durability				
Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Acceptable			
Weak acids	Excellent			
Strong acids	Excellent			
Weak alkalis	Acceptable			
Strong alkalis	Unacceptable			
Organic solvents	Excellent			
Oxidation at 500C	Unacceptable			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Galling resistance (adhesive wear)	Limited use			
Notes	Aluminum alloys perform poorly when self-mated but can be processed without galling when mated with steels.			
Flammability	Non-flammable			
Corrosion resistance of metals				
Stress corrosion cracking	Highly susceptible			
Notes	Rated in chloride; Other susceptible environments: Halide, water			
Primary production energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production (virgin grade)	* 182	-	201	MJ/kg
Embodied energy, primary production (typical grade)	* 111	-	130	MJ/kg
CO2 footprint, primary production (virgin grade)	* 11.9	-	13.1	kg/kg
CO2 footprint, primary production (typical grade)	* 7.44	-	8.66	kg/kg
Water usage	* 1.08e3	-	1.2e3	l/kg
Processing energy, CO2 footprint & water				
Roll forming, forging energy	* 6.29	-	6.95	MJ/kg
Roll forming, forging CO2	* 0.472	-	0.521	kg/kg
Roll forming, forging water	* 4.24	-	6.36	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	* 12.3	-	13.6	MJ/kg

Extrusion, foil rolling CO2	* 0.922	-	1.02	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	* 6.8	-	10.2	l/kg
Wire drawing energy	* 45.3	-	50.1	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 3.4	-	3.76	kg/kg
Wire drawing water	* 17.1	-	25.6	l/kg
Metal powder forming energy	* 20.3	-	22.5	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 1.63	-	1.8	kg/kg
Metal powder forming water	* 22.2	-	33.3	l/kg
Vaporization energy	* 15.5e3	-	17.1e3	MJ/kg
Vaporization CO2	* 1.16e3	-	1.28e3	kg/kg
Vaporization water	* 6.46e3	-	9.69e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 1.38	-	1.52	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.103	-	0.114	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 9.48	-	10.5	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.711	-	0.786	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 18.5	-	20.4	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 1.39	-	1.53	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 155	-	171	MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	* 11.6	-	12.8	kg/kg

Recycling and end of life

Recycle	True			
Embodied energy, recycling	* 31.3	-	34.6	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 2.46	-	2.72	kg/kg
Recycle fraction in current supply	42.8	-	47.3	%
Downcycle	True			
Combust for energy recovery	False			
Landfill	True			
Biodegrade	False			

Possible substitutes for principal component

Copper can replace aluminum in electrical applications; magnesium, titanium, and steel can substitute for aluminum in structural and ground transportation uses. Composites, wood, and steel can substitute for aluminum in construction. Glass, plastics, paper, and steel can substitute for aluminum in packaging.

Geo-economic data for principal component

Principal component	Aluminum			
Typical exploited ore grade	30.4	-	33.6	%
Minimum economic ore grade	25	-	39	%
Abundance in Earth's crust	82.3e3	-	84.1e3	ppm
Abundance in seawater	500e-6	-	5e-3	ppm
Annual world production, principal component	47.3e6			tonne/yr
Reserves, principal component	28e9			tonne

Main mining or production areas (metric tonnes per year)

Argentina, 460e3
Australia, 1.75e6
Bahrain, 900e3
Brazil, 1.33e6
Canada, 2.9e6
China, 21.5e6
Germany, 400e3
Iceland, 825e3
India, 1.7e6
Mozambique, 560e3
Norway, 1.2e6
Qatar, 600e3
Russia, 3.95e6
South Africa, 820e3
United Arab Emirates, 1.8e6
United States, 1.95e6
Other countries, 4.65e6

Notes

Other notes

Cladding when used 1070A/1050A. Prices of Aluminum alloys fluctuate greatly and are dependent on batch size, unit size, forming methods, etc.

Keywords

0.2014 to CSA HA.5; 0.2014 to CSA HA.8; 17105 to NS 17105; 2014; 2014 to AMS 4014; 2014 to AMS 4028; 2014 to AMS 4029; 2014 to AMS 4121; 2014 to AMS 4133; 2014 to AMS 4134; 2014 to AMS 4135; 2014 to AMS 4153; 2014 to AS 1866; 2014 to AS 2848.1; 2014 to ASTM B209M; 2014 to ASTM B210M; 2014 to ASTM B211M; 2014 to ASTM B221M; 2014 to ASTM B241M; 2014 to ASTM B247M; 2014 to COPANT 862; 2014 to MIL A-12545; 2014 to MIL A-22771; 2014 to NBN P21-001; 2014 to NF A50-411; 2014 to NF A50-451; 2014 to QQ A-200/2; 2014 to QQ A-225/4; 2014 to QQ A-367; 20141(AI-Cu4SiMg); 2014A; 2014A clad to BS 1470; 2014A to AS 2848.1; 2014A to BS 1470; 2014A to BS 1472; 2014A to BS 1473; 2014A to BS 1474; 2014A to BS 1475; 2014Alclad to CSA HA.4; 2214; 24345 to IS 733; 24435 to IS 5902; 2L.77; 3.1255; 3.1255/AlCuSiMn to DIN 1725-1; 3.2451.00/AlCu4SiMg; 4338-00; 4338-02; 4338-04; 4338-06; 4338-10; 9002/3; A-U4SG; A-U4Sg; A2014BD to JIS H4040; A2014BE to JIS H4040; A2014FD to JIS H4140; A2014FH to JIS H4140; A2014P to JIS H4000; A2014S to JIS H4100; A2014TE to JIS H4080; A7-U4SG to AIR 9051-A; AK8; ALCAN B26S; Ak 39; Al-P16-T6151; Al-P16-T651; AlCu4SiMg to ISO 209-1; AlCu4SiMg(A) to ISO 209-1; AlCuSiMn to ONORM M3430; Alcan B26S Alclad; Aldural S; Alminal W150; Aluminum Union No. 14S; Apex Pattern Aluminum Alloy; Avional-660; Avional-662; Baw 2014A; Birmetal Bmb 478; Chitonal-14; Deltumin; Duralcan W2A.Xxa-T6; Duralumin S; EN AW-2014 (EN AW-Al Cu4SiMg); EN AW-2014 to CEN EN 573-3; EN AW-2214 to CEN EN 573-3; Federated F1040.3; H15; HB15; HE15; HF15; HG15; HR15; HT15; Kaiser Aluminum 2014; Kynal C66; L-3130; Mk9-As; Mueller 2014; Noral B26 S; P-AlCu4.4SiMnMg; Permold 90-10; Quarzal; Revere 2014; Reynolds 14S; SAE AMS 4014; SAE AMS 4028; SAE AMS 4029;

SAE AMS 4121; SAE AMS 4133; SAE AMS 4134; SAE AMS 4135; SAE AMS 4153; SAE AMS 4314; SAE AMS A 22771; SAE AMS QQ A 200/2; SAE AMS QQ A 225/4; SAE AMS QQ A 250/3; SAE AMS QQ A 367; Super Avional; Ti-666; UNS A92014; UNS A92214; Z-3

Standards with similar compositions

- Australia:

2014 to AS 1866, 2014 to AS 2848.1, 2014A to AS 2848.1

- Austria:

AlCuSiMn to ONORM M3430

- Belgium:

2014 to NBN P21-001

- Canada:

0.2014 to CSA HA.5, 0.2014 to CSA HA.8, 2014Alclad to CSA HA.4

- Europe:

EN AW-2014 to CEN EN 573-3, EN AW-2214 to CEN EN 573-3

- France:

2014 to NF A50-411, 2014 to NF A50-451, A7-U4SG to AIR 9051-A

- Germany:

3.1255/AlCuSiMn to DIN 1725-1

- India:

24345 to IS 733, 24435 to IS 5902

- International:

AlCu4SiMg to ISO 209-1, AlCu4SiMg(A) to ISO 209-1

- Japan:

A2014BD to JIS H4040, A2014BE to JIS H4040, A2014FD to JIS H4140, A2014FH to JIS H4140, A2014P to JIS H4000, A2014S to JIS H4100, A2014TE to JIS H4080

- Norway:

17105 to NS 17105

- UK:

2014A clad to BS 1470, 2014A to BS 1470, 2014A to BS 1472, 2014A to BS 1473, 2014A to BS 1474, 2014A to BS 1475

- USA:

2014, 2014 to AMS 4014, 2014 to AMS 4028, 2014 to AMS 4029, 2014 to AMS 4121, 2014 to AMS 4133, 2014 to AMS 4134, 2014 to AMS 4135, 2014 to AMS 4153, 2014 to ASTM B209M, 2014 to ASTM B210M, 2014 to ASTM B211M, 2014 to ASTM B221M, 2014 to ASTM B241M, 2014 to ASTM B247M, 2014 to MIL A-12545, 2014 to MIL A-22771, 2014 to QQ A-200/2, 2014 to QQ A-225/4, 2014 to QQ A-367, 2014A, 2214, UNS A92014, UNS A92214

- Venezuela:

2014 to COPANT 862

- Tradenames:

ALCAN B26S, ALCAN B26S ALCLAD, AVIONAL-660, AVIONAL-662, BAW 2014A, DURALCAN W2A.XXA-T6, KAISER ALUMINUM 2014

Links

ASME BPVC-IIID Database

Elements in this material

Global Metals similar alloys

JAHM Curve data

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.

Ansys Granta provides no warranty for this data.

№3 3003, O, unknown strain rate

Material information

Material family

Material category

Material

UNS number

European standard (EN/DIN)

State

Heat treatment

Descriptor

Test information

Export analysis type

Test temperature

Composition - elements

Base element

Al (aluminum)

Cu (copper)

Fe (iron)

Mn (manganese)

Si (silicon)

Zn (zinc)

Physical properties

Density

Parameters: Temperature = 23°C

Metals and alloys

Aluminum Alloys

3003

A93003

AlMn1Cu

Solid

O

unknown strain rate

Elastic, Elastic & Plastic, Plastic, Weight

-270 - 500 °C

Al (aluminum)

* 96.9 - 99 %

50e-3 - 0.2 %

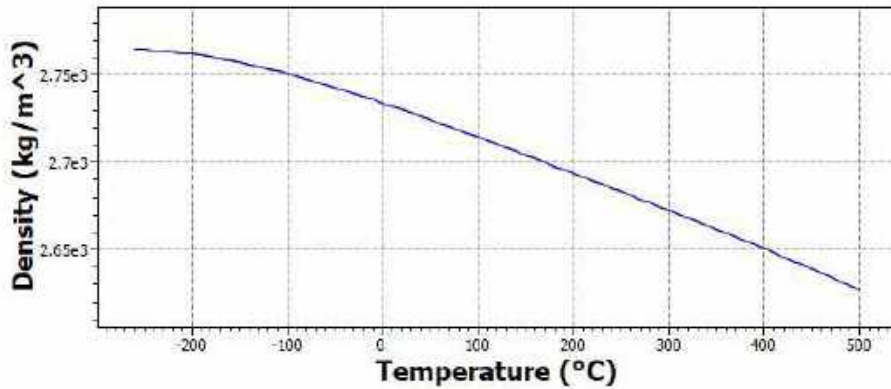
0 - 0.7 %

1 - 1.5 %

0 - 0.6 %

0 - 0.1 %

* 2.73e3 kg/m³



Reference
calculated from the linear expansion

Note
Copied from '3003, All conditions'

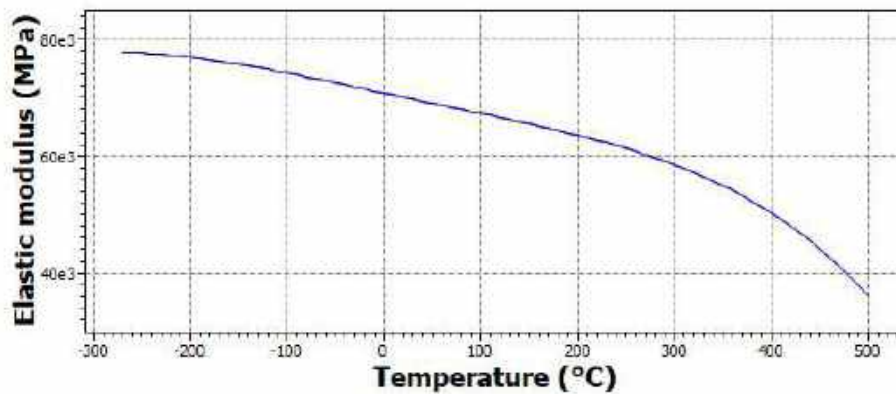
Mechanical properties

Elastic modulus

Parameters: Temperature = 23°C

* 70e3

MPa



Note
uncertainty at -273.1°C (-459.7°F) is 5%, at 500°C (932°F) it is 10%
Copied from '3003, All conditions'

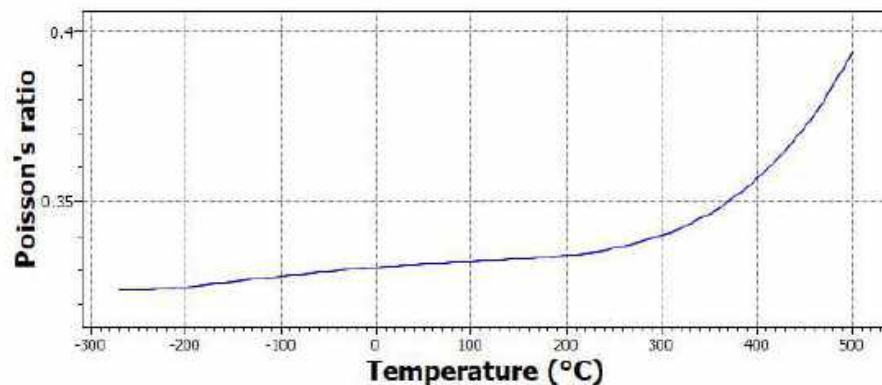
Reference
room temperature value from ASM Handbook, v2, 10th edition, ASM International (1992) and temperature dependence from M. Lalpoor, D.G. Eskin, L. Katgerman, Metallurgical and Materials Transactions A, v40A, No. 13, p3304 (2009) and S.C. Sharma, Metallurgical and Materials Transactions A, v31A, No. 3, p773 (2000) and K. Sakai, A. Matsumuro, M. Senoo, Journal of Materials Science, v31, No. 12, p3309 (1996) and E.R. Naimon, H.M. Ledbetter, W.F. Weston, Journal of Materials Science, v10, p1309 (1975) and R.B. McLellan, T. Ishikawa, Journal of Physics and Chemistry of Solids, v48, No. 7, p603 (1987) and H.J. Stokes, Scientific Instruments, v37, p117 (1960)

Poisson's ratio

Parameters: Temperature = 23°C

* 0.331

- 0.331



Reference
temperature dependence from M. Lalpoor, D.G. Eskin, L. Katgerman, Metallurgical and Materials Transactions A, v40A, No. 13, p3304 (2009) and S.C. Sharma, Metallurgical and Materials Transactions A, v31A, No. 3, p773 (2000) and K. Sakai, A. Matsumuro, M. Senoo, Journal of Materials Science, v31, No. 12, p3309 (1996) and E.R. Naimon, H.M. Ledbetter, W.F. Weston, Journal of Materials Science, v10, p1309 (1975) and R.B. McLellan, T. Ishikawa, Journal of Physics and Chemistry of Solids, v48, No. 7, p603 (1987) and H.J. Stokes, Scientific Instruments, v37, p117 (1960)

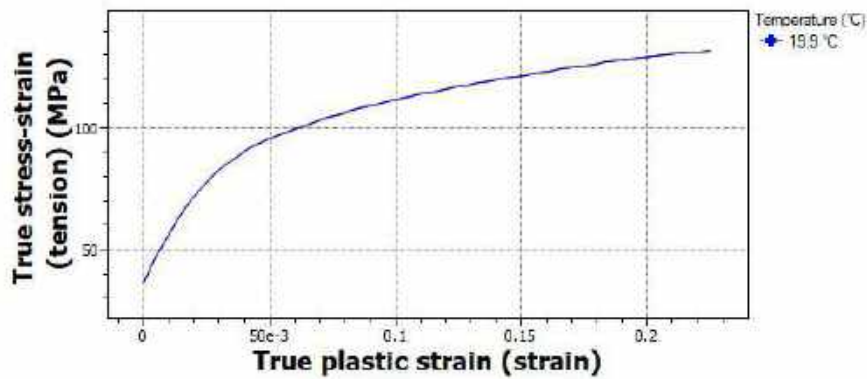
Note
uncertainty at -273.1°C (-459.7°F) is 5%, at 500°C (932°F) it is 10%
Copied from '3003, All conditions'

True stress-strain (tension)

Parameters: True plastic strain = 0strain, Temperature = 23°C

Out Of Range

MPa



Composition
bal. Al, (1-1.5) Mn, (0.05-0.2) Cu, 0.7 Fe max, 0.6 Si max, 0.1 Zn max (wt%)

Note
tested at 20°C (68°F) at an unknown strain rate in tension, -O temper, 12.7 mm diameter rod, 203.2 mm gage length

Strain rate

Reference
Atlas of Stress-Strain Curves, ASM International (2002), p367-369
Values marked * are estimates.
Data compiled by JAHM Software and licensed for distribution by Granta Design Limited, a subsidiary of Ansys, Inc.
Ansys Granta provides no warranty for this data.

№4 A357, solution heated, cast rod, Strain rate=0.00033/s

Material information

Material family
Material category
Material
State
Heat treatment
Product form

Metals and alloys
Aluminum Alloys
A357
Solid
solution heated
cast rod

Test information

Export analysis type
Test temperature
Strain rate

Elastic, Elastic & Plastic, Plastic
-270 - 500 °C
330e-6 strain/s

Composition - elements

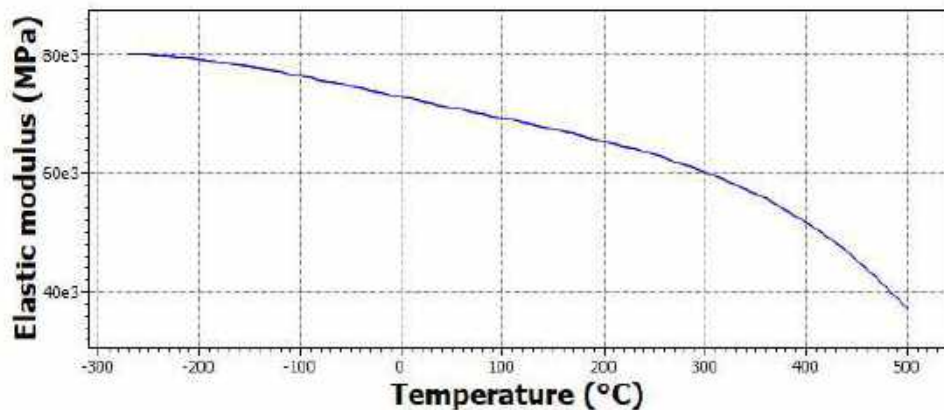
Base element
Al (aluminum)
Fe (iron)
Mg (magnesium)
Mn (manganese)
Si (silicon)
Ti (titanium)

Al (aluminum)			
* 92.1	-	92.2	%
0.12			%
0.55			%
0	-	0.1	%
7			%
0.1			%

Mechanical properties

Elastic modulus
Parameters: Temperature = 23°C

* 72e3 MPa



uncertainty at -273.1°C (-459.7°F) is 5%, at 500°C (932°F) it is 10%
Copied from 'A357, All conditions'

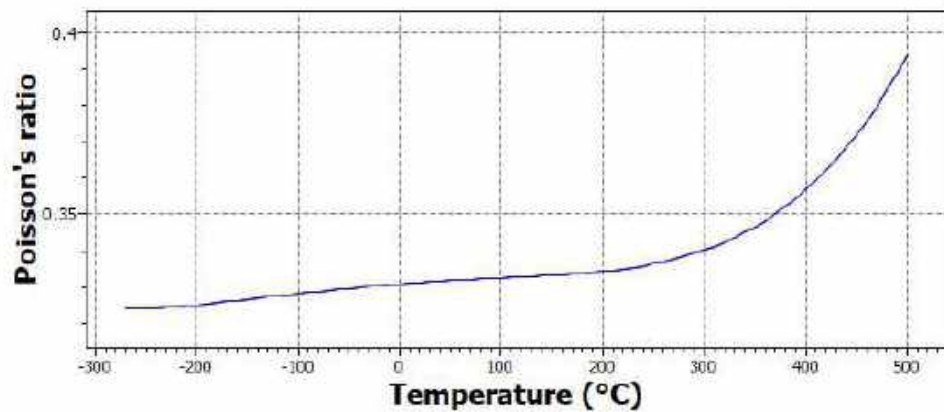
Reference
room temperature value from ASM Handbook, v2, 10th edition, ASM International (1992) and temperature dependence from M. Lalpoor, D.G. Eskin, L. Katgerman, Metallurgical and Materials Transactions A, v40A, No. 13, p3304 (2009) and S.C. Sharma, Metallurgical and Materials Transactions A, v31A, No. 3, p773 (2000) and K. Sakai, A. Matsumuro, M. Senoo, Journal of Materials Science, v31, No. 12, p3309 (1996) and E.R. Naimon, H.M. Ledbetter,

W.F. Weston, Journal of Materials Science, v10, p1309 (1975) and R.B. McLellan, T. Ishikawa, Journal of Physics and Chemistry of Solids, v48, No. 7, p603 (1987) and H.J. Stokes, Scientific Instruments, v37, p117 (1960)

Poisson's ratio

Parameters: Temperature = 23°C

* 0.331 - 0.331



Reference

temperature dependence from M. Lalpoor, D.G. Eskin, L. Katgerman, Metallurgical and Materials Transactions A, v40A, No. 13, p3304 (2009) and S.C. Sharma, Metallurgical and Materials Transactions A, v31A, No. 3, p773 (2000) and K. Sakai, A. Matsumuro, M. Senoo, Journal of Materials Science, v31, No. 12, p3309 (1996) and E.R. Naimon, H.M. Ledbetter, W.F. Weston, Journal of Materials Science, v10, p1309 (1975) and R.B. McLellan, T. Ishikawa, Journal of Physics and Chemistry of Solids, v48, No. 7, p603 (1987) and H.J. Stokes, Scientific Instruments, v37, p117 (1960)

Note

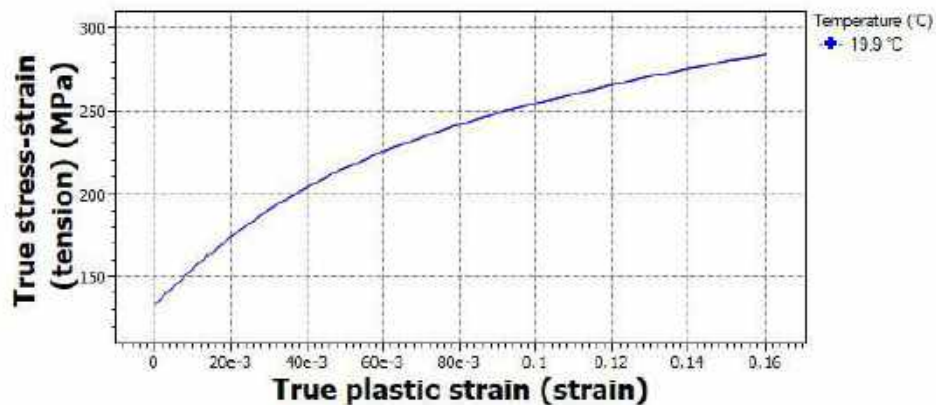
uncertainty at -273.1°C (-459.7°F) is 5%, at 500°C (932°F) it is 10%
Copied from 'A357, All conditions'

True stress-strain (tension)

Parameters: True plastic strain = 0strain, Temperature = 23°C

Out Of Range

MPa



Composition

bal. Al, 7.0 Si, 0.55 Mg, 0.10 Ti, 0.12 Fe, 0.10 Mn max (wt%)

Note

tested at 20°C (68°F) at a strain rate of 3.30e-04/s in tension, continuous cast rods from Pechiney France, solution heated for 22 h at 540°C (1004°F) and water quenched, secondary dendrite arm spacing of 27 micron

Strain rate

330e-6

Reference

N.D. Alexopoulos, M. Tiryakioglu, Metallurgical and Materials Transactions A, v40A, No. 3, p702 (2009)

Links

Global Metals similar alloys

MaterialUniverse

Values marked * are estimates.

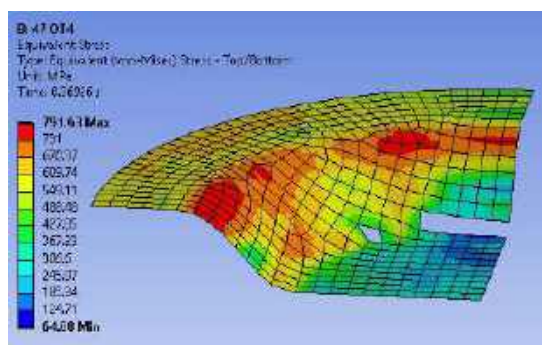
Data compiled by JAHM Software and licensed for distribution by Granta Design Limited, a subsidiary of Ansys, Inc.
Ansys Granta provides no warranty for this data.

ДОДАТОК В

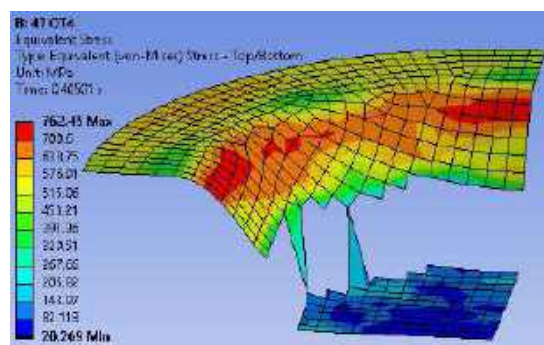
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Таблиця В.1 – Результати розрахунків

№	Діаметр заготовки, мм	Матеріал	Переміщення пуансона, мм		Номер рисунка з ізополями напружень
			Початок руйнування	Повне відривання	
1	47	ОТ4	5.6	9.3	В1
2		Д16Т	4.5	5.2	В2
3		АМг	6.3	7.4	В3
4		АМц	5.2	5.8	В4
5	52	ОТ4	4.4	8.0	В5
6		Д16Т	4.0	7.5	В6
7		АМг	4.8	5.5	В7
8		АМц	4.7	5.4	В8
9	63	ОТ4	4.3	5.0	В9
10		Д16Т	3.9	9.2	В10
11		АМг	4.7	7.8	В11
12		АМц	4.7	5.4	В12
13	100	ОТ4	4.6	4.9	В13
14		Д16Т	4.3	4.7	В14
15		АМг	5.5	7.3	В15
16		АМц	5.2	5.9	В16

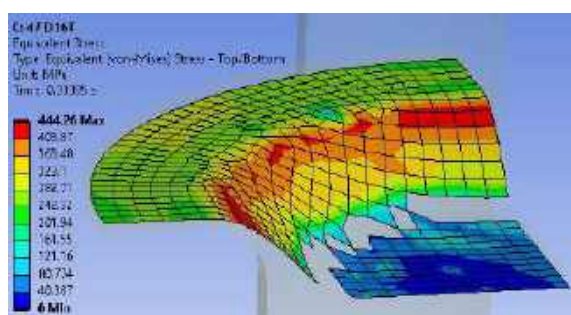


а

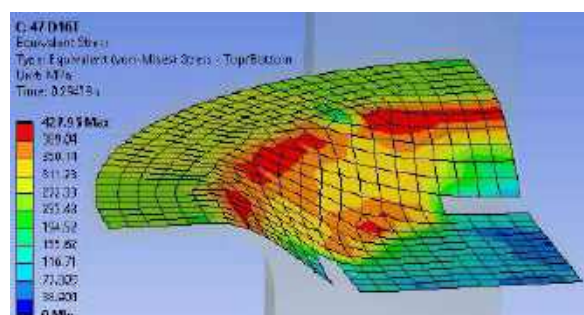


б

Рисунок В1

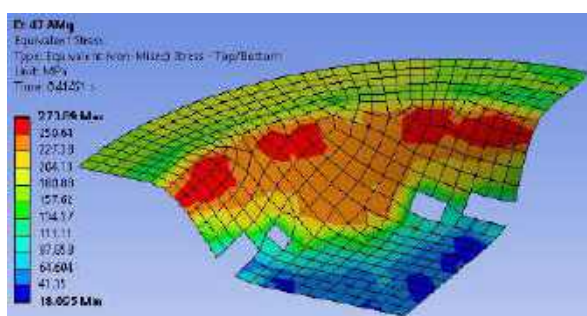


а

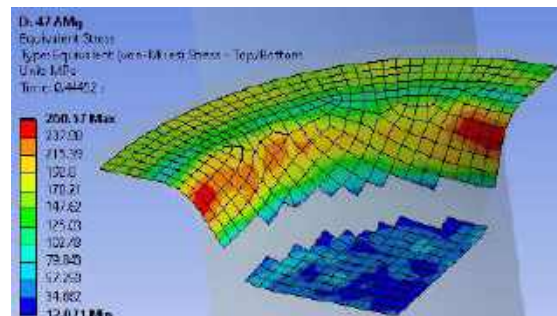


б

Рисунок В2

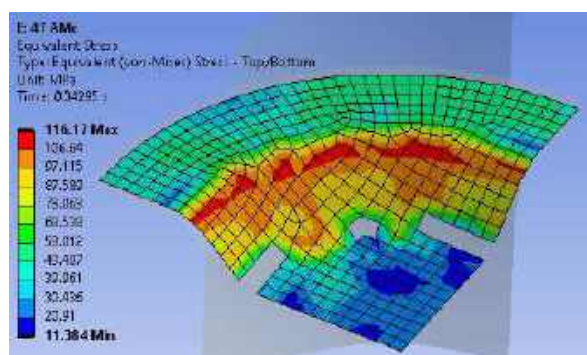


а

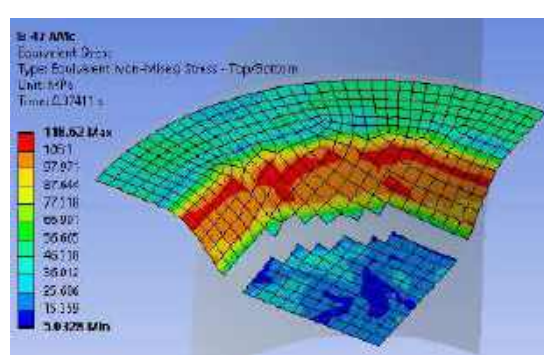


б

Рисунок В3

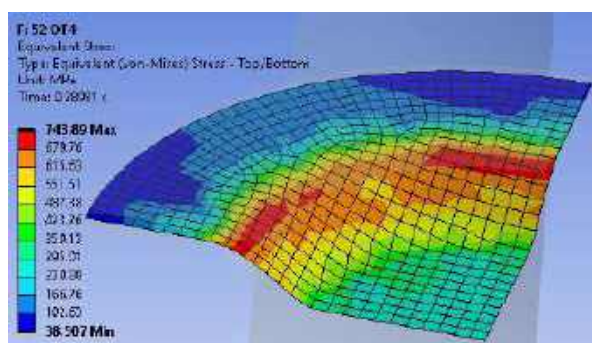


а

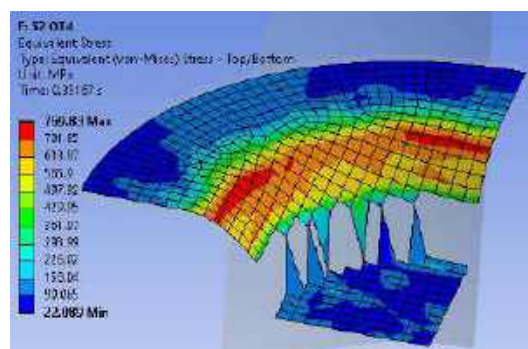


б

Рисунок В4

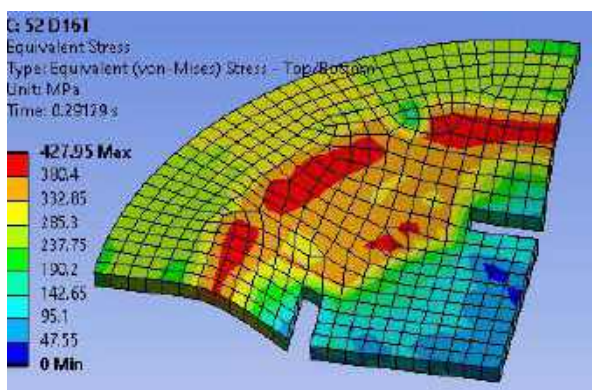


а

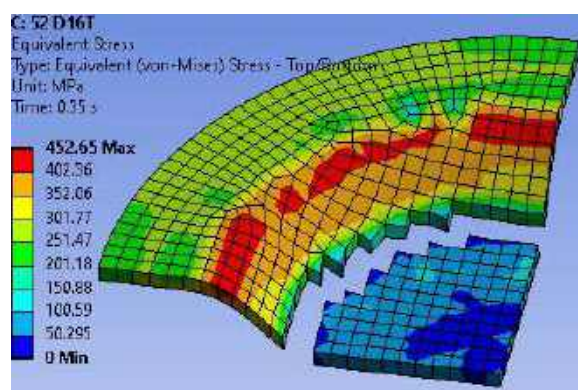


б

Рисунок В5

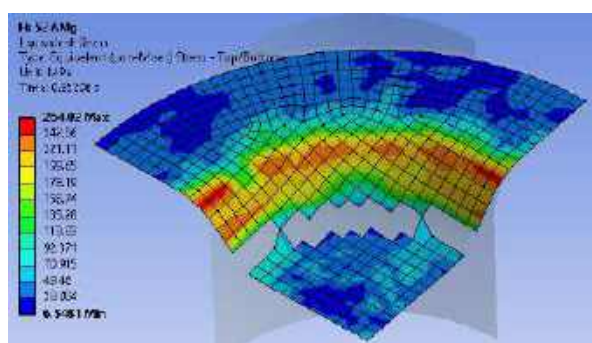


а

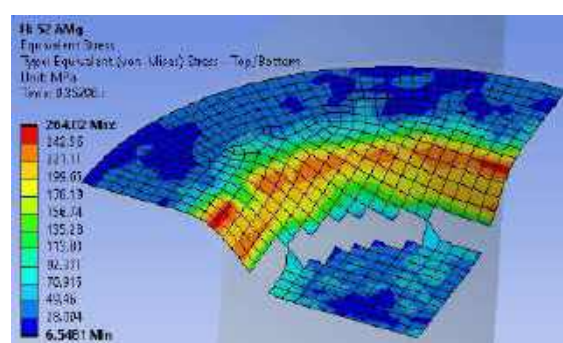


б

Рисунок В6

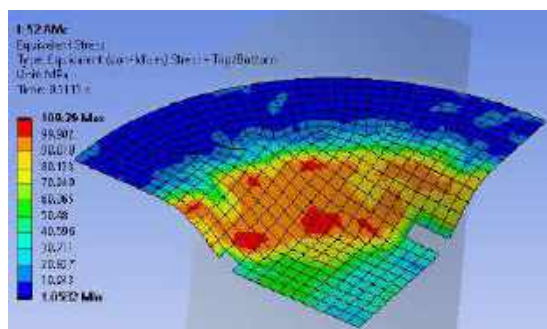


а

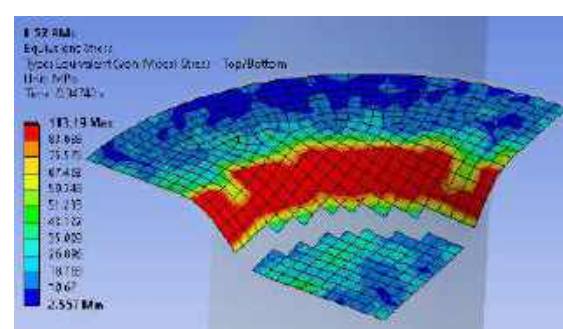


б

Рисунок В7

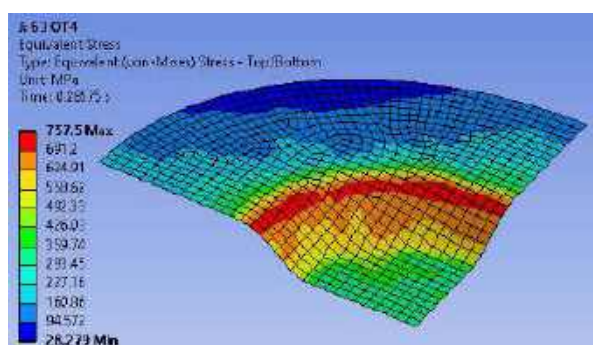


а

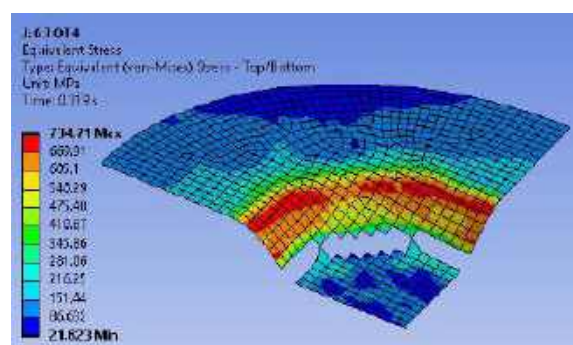


б

Рисунок В8

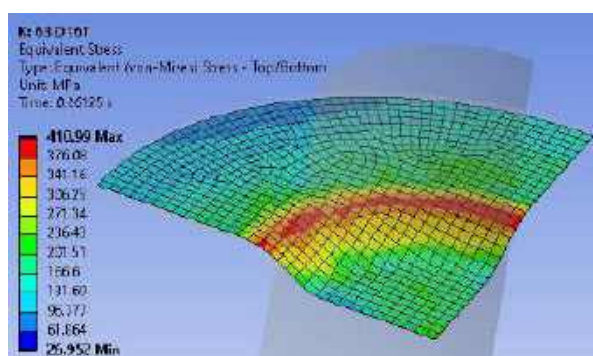


а

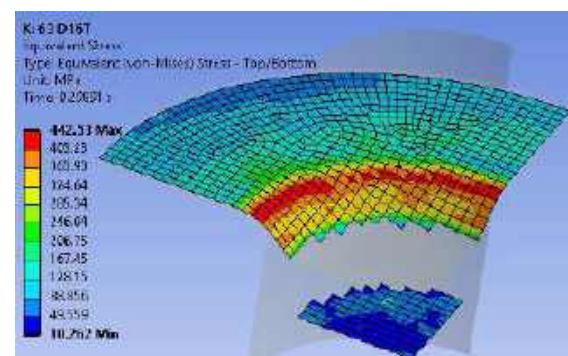


б

Рисунок В9

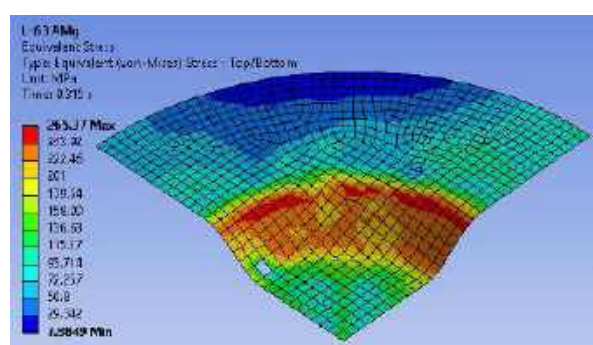


а

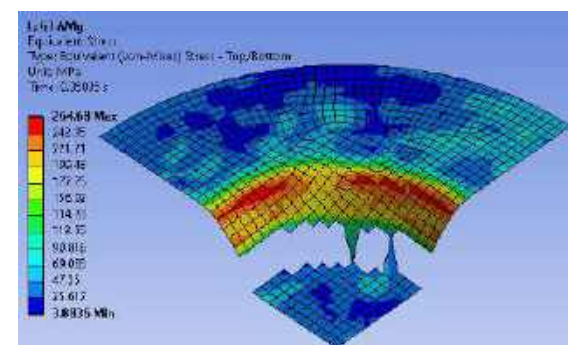


б

Рисунок В10

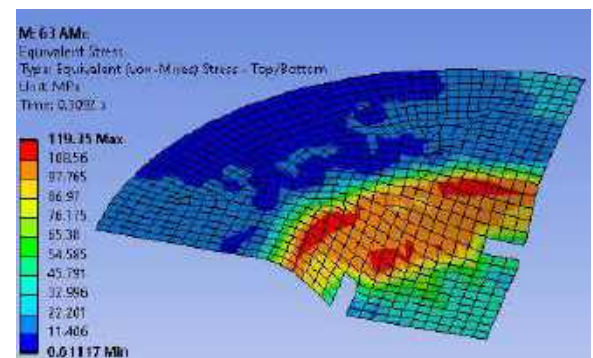


а

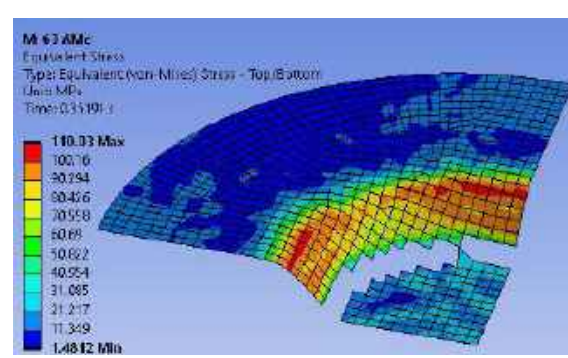


б

Рисунок В11

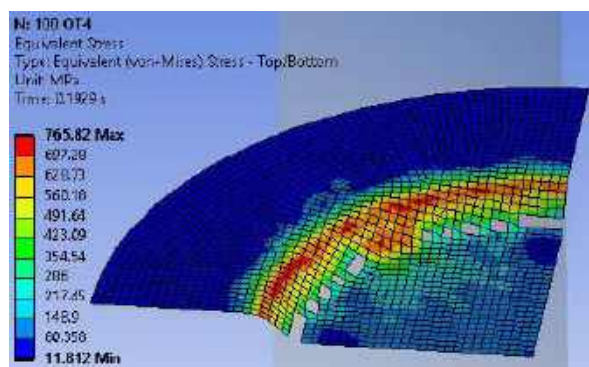


а

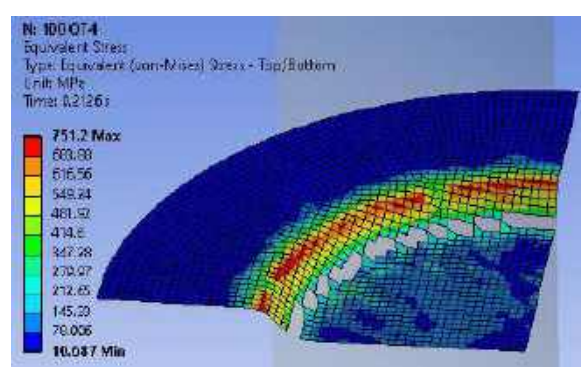


б

Рисунок В12

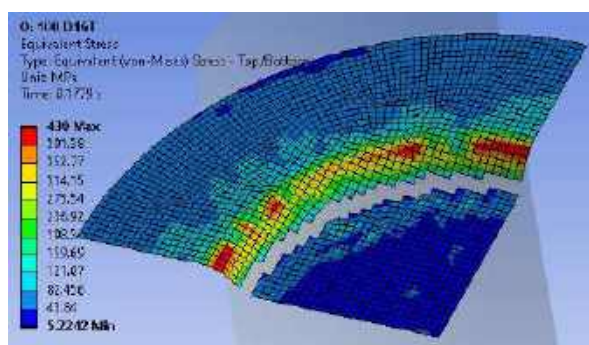


а

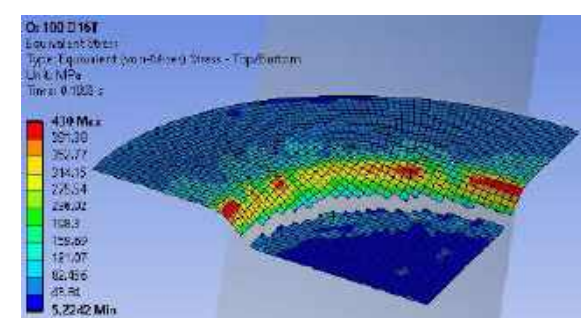


б

Рисунок В13

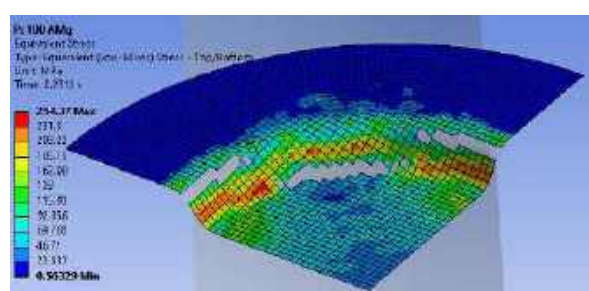


а

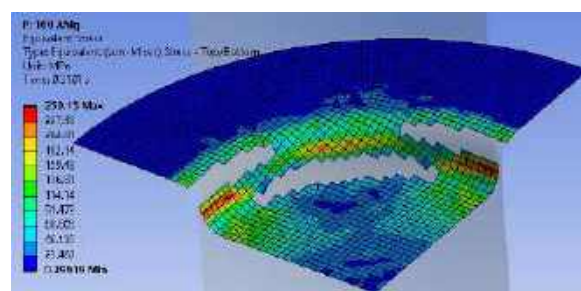


б

Рисунок В14

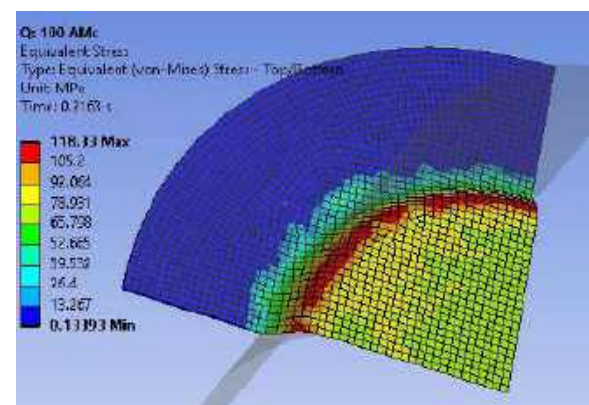


а

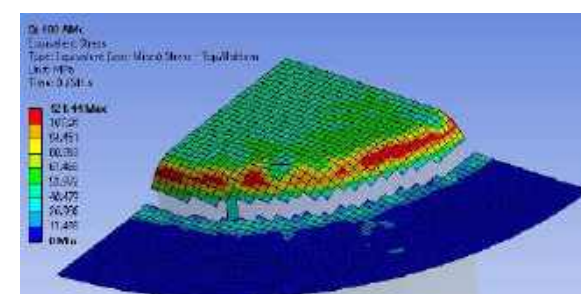


б

Рисунок В15



а



б

Рисунок В16

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о ректора Національного
аерокосмічного університету

ім. М. С. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

пр. юрид. наук, професор

Олексій ЛИТВИНОВ

2025 р.



Акт

про використання результатів дисертаційної роботи Онопченка А. В.
«Удосконалення технології штампування-витягування авіаційних деталей
складної форми з урахуванням кінематики течії металу на ребрах матриць» в
навчальному процесі кафедри технологій виробництва авіаційних двигунів
(№ 204) Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Науково-дослідницька робота за вищевказаною темою виконувалась
здобувачем Онопченко Антоном Віталійовичем на кафедрі технологій
виробництва авіаційних двигунів у період з 2010 по 2024 рр. Отримані
результати впроваджено в навчальному процесі кафедри № 204 в
навчальному курсі «Технологія виробництва та ремонту авіаційних двигунів
та енергетичних установок», де були використані методичні матеріали для
визначення режимів штампування-витягування листових деталей з титанових
сплавів. Результати дослідження у вигляді відповідних рекомендацій з
проекування операцій штампування-витягування листових деталей
авіаційних двигунів використано при виконанні магістерських робіт, а також
в матеріалах курсових та дипломних проектів.

Зав. кафедри технологій виробництва
авіаційних двигунів,
канд. техн. наук, доцент

Сергій НИЖНИК

Директорка Центру якості освіти,
ліцензування та акредитації

Елеонора ДАРМОФАЛ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер
АТ «Мотор Січ»
Костянтин БАЛУШОК
2025 р.

**Акт**

про впровадження результатів дисертаційної роботи Онопченка А. В.
«Удосконалення технології штампування-витягування авіаційних деталей
складної форми з урахуванням кінематики течії металу на ребрах матриць»
на публічному акціонерному товаристві «Мотор Січ»

Цей акт підтверджує, що результати наукових досліджень, які освітлені в дисертаційній роботі Онопченка Антона Віталійовича, були використані на АТ «Мотор Січ» в 2023-2024 р.р. при виготовленні деталей типу дефлектор для авіаційних двигунів Д-136.

Реалізація технологічних рекомендацій при штампуванні-витягуванні деталей складної форми дозволила оптимізувати технологічні процеси та скоротити час виготовлення штампуванням-витягуванням листових деталей складної форми.

При участі Онопченка А. В. розроблено рекомендації щодо впровадження комплексної технології виготовлення листових деталей складної форми з титанових сплавів.

Очікуваний економічний ефект від впровадження технології – 250 тис. грн. на рік.

Даний акт не є підставою для отримання матеріальної вигоди.

Начальник УГТ



Ігор ЗОБЕНЬКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

АТ «СВІТЛО ШАХТАРЯ»

Дергоусов Вадим Миколайович



Акт

про впровадження результатів дисертаційної роботи Онопченка А. В.
«Удосконалення технології штампування-витягування авіаційних деталей
складної форми з урахуванням кінематики течії металу на ребрах матриць»
на АТ «СВІТЛО ШАХТАРЯ»

Цей акт складений в тому, що результати наукових досліджень, освітлених у кандидатській дисертації Онопченка А. В. були використані на підприємстві АТ «СВІТЛО ШАХТАРЯ» у 2024 р. при розробці технологічних процесів, які містять операції штампування-витягування з листових заготовок.

Реалізація технологічних рекомендацій при штампуванні-витягуванні листових деталей складної форми дозволила удосконалити технологічні процеси виготовлення складно-профільних деталей з листових заготовок та забезпечила скорочення часу на їх виготовлення.

При участі Онопченка А. В. розроблено рекомендації щодо впровадження комплексної технології виготовлення листових деталей складної форми з титанових сплавів.

Очікуваний економічний ефект від впровадження технології – 275 тис. грн. на рік.

Даний акт не є підставою для отримання матеріальної вигоди.

/Березинський Р.А./



АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО «УКРАЇНЬСЬКА ОБОРОННА ПРОМИСЛОВІСТЬ»

№ 002-16/144-01/15.34 від 25.03.2025

на № _____ від _____



**Державне підприємство
«Завод імені В.О. Малишева»**

вул. Тарасенка Георгія, 126, м. Харків, 61037, Україна

тел.: +38(057)784-41-71

Код ЄДРПОУ 14315629

www.malyshevplant.com

e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua

Акт

про впровадження результатів дисертаційної роботи Онопченка А. В.
«Удосконалення технології штампування-витягування авіаційних деталей
складної форми з урахуванням кінематики течії металу на ребрах матриць»
на державному підприємстві «Завод імені В. О. Малишева»

Цей акт складений в тому, що результати наукових досліджень, освітлених у кандидатській дисертації Онопченка А. В. були використані на державному підприємстві «Завод імені В. О. Малишева» у 2023-2024 рр. при розробці технологічних процесів, які містять операції штампування-витягування з листових заготовок.

Реалізація технологічних рекомендацій при штампуванні-витягуванні листових деталей складної форми дозволила удосконалити технологічні процеси виготовлення складно-профільних деталей з листових заготовок та забезпечила скорочення часу на їх виготовлення.

При участі Онопченка А. В. розроблено рекомендації щодо впровадження комплексної технології виготовлення листових деталей складної форми з титанових сплавів.

Очікуваний економічний ефект від впровадження технології – 250 тис. грн. на рік.

Даний акт не є підставою для отримання матеріальної вигоди.

Головний інженер



Роман НЕЧАЄВ

032235