

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

Онопченко Антон Віталійович



УДК 621.98.043 : 539.312 : 621.452.3.002 : 629.7.01(043)

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

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Харків – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Курін Максим Олександрович,
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»,
професор кафедри технологій
виробництва авіаційних двигунів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сметанкіна Наталя Володимирівна,
Інститут енергетичних машин і систем
ім. А. М. Підгорного НАН України, завідувач
відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень;

доктор технічних наук, професор
Воронько Віталій Володимирович,
Харківський національний університет міського
господарства імені О. М. Бекетова, проректор
з науково-педагогічної роботи

Захист відбудеться « 15 » липня 2025 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.062.04 у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17.

Автореферат розіслано « 09 » червня 2025 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



А. О. Бреус

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з основних напрямків розвитку сучасної технології виробництва деталей авіаційної техніки є скорочення обсягу технологічних процесів зі зняття металевого шару та 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 і двигунів. Це виключає застосування зварювальних операцій під час виготовлення великих деталей зі складною криволінійною поверхнею. 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. 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.

Радіус перетяжного ребра матриці штампу має значний вплив на такі важливі параметри процесу витягування, як напруження в матеріалі, зусилля витягування, утворення гофрів, стоншення матеріалу стінки, граничний ступінь витягування та довговічність. Це потребує 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 проектування. У зв'язку з цим виникла необхідність у розробленні методу отримання полів швидкостей процесу листового штампування, який повністю відображає фізику процесу та водночас є 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 удосконалення технології штампування-витягування авіаційних деталей складної форми з урахуванням кінематики течії металу на ребрах матриць, є актуальними та заслуговують на увагу.

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 нанокомпозитних 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).

Мета й 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 натурного 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. Цифрове моделювання процесу холодного штампування-витягування проводилося за допомогою ліцензійного пакета скінченних елементів LS-DYNA версії R11.2.2.

Наукова новизна одержаних 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 запропонованого 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

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 лежать 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 річний економічний 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».

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 результатів 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 «ХАІ».

Публікації. Основний зміст роботи відображено у 12 публікаціях: 7 статей (дві без співавторів) у збірках, включених до переліку наукових фахових видань України, три з яких належать до міжнародних наукометричних баз даних (**Scopus та Web of Science**), п'ять тез доповідей на науково-технічних конференціях, одна з яких належить до міжнародних наукометричних баз даних (**Scopus та Web of Science**).

Структура і обсяг роботи. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми та необхідність вибраного напрямку досліджень, сформульовано їх мету і задачі, викладено наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено огляд літературних джерел, в яких подано аналіз сучасного стану процесів штампування листових деталей. Розглянуто шляхи інтенсифікації та методи підвищення ефективності процесу штампування-витягування авіаційних деталей складної форми. Відзначено актуальність завдання побудови раціональних технологічних процесів, що дають мінімальні трудомісткість та собівартість виготовлення деталей авіаційної техніки за потрібної їх якості. Проаналізовано операції листового штампування та їх головні переваги. Розроблено структурну схему напрямків досліджень у галузі штампування листового металу (рисунок 1).



Рисунок 1 – Структурна схема напрямків досліджень у галузі листового штампування

Як показує аналіз виконаних досліджень, удосконалення процесу листового штампування досі залишається актуальним, велика увага приділяється впливу температури, змащувальних матеріалів, конфігурації штампового оснащення на процес листового штампування. Розглянуто якість витягування зразків та вплив глибокого витягування на мікроструктуру та текстуру зразків. Наведено дослідження морфології захисного покриття сталевих листів до і після глибокого витягування. Проаналізовано методи підвищення ефективності листового штампування.

Внаслідок виконаного аналізу сформульовано мету і визначено задачі дисертаційної роботи.

Дані, наведені в розділі 1, опубліковано в роботах [5, 7, 11].

Другий розділ присвячено методології досліджень. Подано опис устаткування для штампування, обґрунтовано вибір матеріалів, запропоновано структуру дослідження енергосилових параметрів процесу штампування-витягування і якості виробів.

Для ефективного прогнозування енергосилових характеристик різних видів оброблення тиском, у тому числі й листового штампування, необхідним є розроблення математичних моделей, що відображають взаємозв'язок функціональних характеристик процесу з технологічними параметрами режимів оброблення. Найбільш придатними для розрахунку процесів пластичної деформації є методи, основані на замкнутій системі рівнянь механіки суцільного середовища. У цьому випадку для опису процесу деформації вводиться тривимірний простір, а процес деформації в цілому можна описати, увівши функцію трьох змінних:

$$f(x, y, z) = 0.$$

Швидкість частинок у тривимірному просторі можна подати через вектор швидкості

$$\vec{V} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}. \quad (1)$$

Поле швидкостей переміщення частинок при пластичній течії металу має бути соленоїдним або вихровим:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{v} &= 0; \\ \operatorname{rot} \vec{v} &\neq 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Використовуючи рівняння (1) і (2) можна визначити вид функціональної залежності швидкості від координат. Таким чином, визначається поле швидкостей частинок матеріалу, що дає можливість розрахувати швидкості деформацій та їх інтенсивність за формулами

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

де q_1, q_2, q_3 – ортогональні криволінійні координати; $H_k = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial x_i}{\partial q_k} \right)^2}$ – параметри Ла-мє.

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

Далі необхідно визначити складові деформації

$$e_{11} = \int \varepsilon_{11} dt,$$

$$e_{12} = \int \varepsilon_{12} dt$$

та інтенсивність деформації

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

Якщо деформація здійснюється з малою швидкістю, то функція швидкості має досить мале значення порівняно з функцією дисипації енергії і нею можна знехтувати. У цьому випадку робота деформації буде визначатися виключно через функцію дисипації енергії:

$$A = \int \int \int \int_t E dv dt. \quad (3)$$

Якщо мова йде про імпульсні технології, то треба додатково враховувати функцію швидкості – роботу, яка спрямована на збільшення кінетичної енергії елементарного об'єму металу в процесі деформації.

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

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.

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

Дані, наведені в розділі 2, опубліковано в роботах [2, 10, 12].

У третьому розділі розглянуто математичне моделювання процесу листового штампування-витягування. Досліджено кінематику процесу течії металу на перетяжному ребрі при штампуванні-витягуванні. Ребро матриці – це частина тора, яка описується системою параметричних рівнянь:

$$\begin{cases} x(t, \varphi) = (R + r \cos(\omega t)) \cos(\omega t) \\ y(t, \varphi) = (R + r \cos(\omega t)) \sin(\omega t), \\ z(t, \varphi) = \pm r \sin(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

де r – радіус ребра матриці; R – відстань від осі обертання тора до осі твірної; t – час деформації; ω – стала.

Система рівнянь (4) описує тороїдну поверхню в декартових координатах. Для пошуку складових швидкостей зручніше перейти до циліндричної системи.

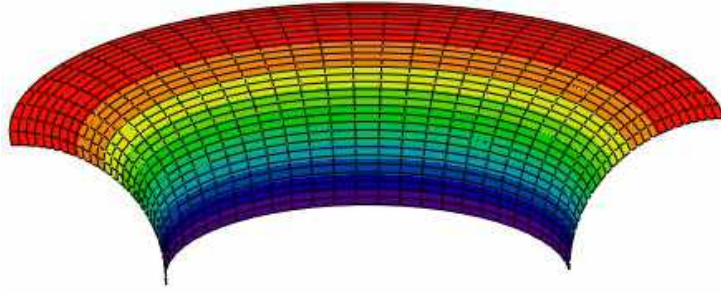


Рисунок 2 – Загальний вигляд фрагмента тороїдної поверхні

Після диференціювання системи рівнянь (4) за часом і переходу до ейлерових координат отримуємо систему рівнянь, що описують поле швидкостей переміщень металу на ребрі матриці. Таким чином, поле швидкостей течії металу при деформації має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} V_{\rho} &= -\frac{V_0}{r} \sqrt{r^2 - (\rho - R)^2} \\ V_z &= -\frac{V_0}{r} \sqrt{r^2 - z^2} \\ V_{\psi} &= \left[\frac{V_0 [r^2 - (R - \rho)(R - 2\rho)]}{r \sqrt{r^2 - (R - \rho)^2}} - \frac{V_0 z \rho}{r \sqrt{r^2 - z^2}} \right] \psi \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Систему (5) 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.

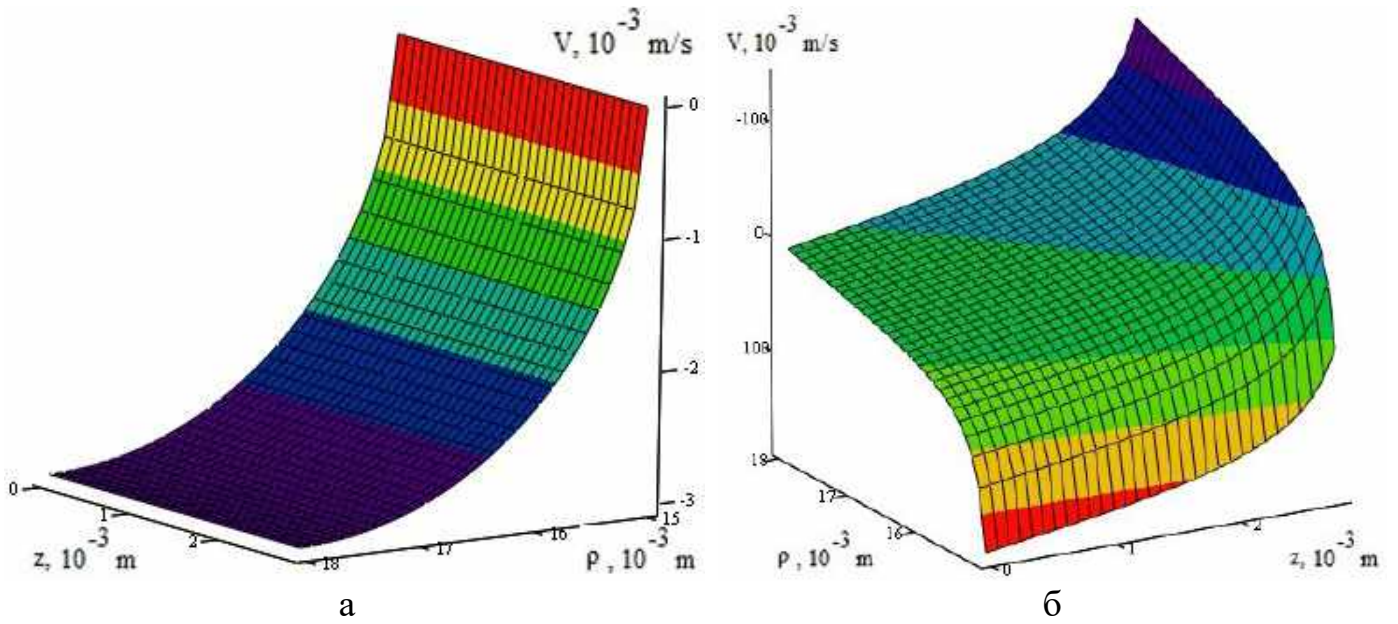
Оскільки складові швидкості в системі (4) паралельні до осей циліндричної системи і взаємно перпендикулярні, модуль швидкості можна розрахувати за відомою формулою:

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

Поля швидкостей і деформацій, а також їх інтенсивності розраховуються за допомогою системи (5) 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 залежності радіальної (рисунок 3, а) і трансверсальної (рисунок 3, б) складових швидкості від координат при вихідних даних $r = 3$ мм, $R = 18$ мм і $V = 3$ мм/с. Ці вихідні дані відповідають діаметру матриці робочої частини 30 мм і радіусу ребра матриці 3 мм.

Як бачимо з рисунка 3, вигляд наведених залежностей корелює з фізичною моделлю процесу оброблення, а також з реальною картиною течії матеріалу заготовки, що спостерігається експериментально.



а – радіальна складова ($\psi = 0$); б – трансверсальна складова ($\psi = \pi$)
Рисунок 3 – Швидкості течії металу на перетяжному ребрі матриці

Швидкість деформації під час штампування-витягування є важливим параметром, який використовується для опису пластичної течії матеріалу. Поле швидкостей переміщень матеріальних частинок дає змогу визначити швидкості деформацій, які в нашому випадку набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\rho\rho} &= \frac{\partial V_\rho}{\partial \rho}; \varepsilon_{\psi\psi} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial V_\psi}{\partial \psi} + \frac{V_\rho}{\rho}; \varepsilon_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z}; \varepsilon_{\psi z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial V_z}{\partial \psi} + \frac{\partial V_\psi}{\partial z}; \\ \varepsilon_{\rho\psi} &= \frac{\partial V_\psi}{\partial \rho} - \frac{V_\psi}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial V_\rho}{\partial \psi}; \varepsilon_{\rho z} = \frac{\partial V_\rho}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial \rho} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Використовуючи рівняння (5) і здійснивши дії, зазначені у співвідношеннях (6), отримали вирази для швидкостей деформацій. Унаслідок інтегрування швидкостей деформацій у часі отримано такі вирази для складових деформацій:

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

$$e_{\rho\psi} = \psi t \left[\frac{V_0(3R - 4\rho)}{r\sqrt{r^2 - (R - \rho)^2}} - \frac{V_0 z}{r\sqrt{r^2 - z^2}} + \frac{V_0(2R - 2\rho)[(R - \rho)(R - 2\rho) - r^2]}{2r[r^2 - (R - \rho)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] +$$

$$+ \frac{\psi \left[\frac{V_0[(R - \rho)(R - 2\rho) - r^2]}{r\sqrt{r^2 - (R - \rho)^2}} + \frac{V_0 \rho z}{r\sqrt{r^2 - z^2}} \right]}{\rho} t.$$

Отримані вирази дають змогу відтворювати просторову картину розподілу деформацій в металі при штампуванні-витягуванні на перетяжному ребрі матриці, що дає змогу наочно уявити механізм деформування і спростити аналіз деформованого стану матеріалу.

Інтенсивність напружень розраховували за формулою

$$\sigma_i = m \sigma_t e_i^n,$$

де m – коефіцієнт, що враховує змінення границі текучості матеріалу ($m \sigma_t$ – напруження течії при логарифмічній деформації $e_i = 1$), n – коефіцієнт деформаційного зміцнення; σ_t – границя текучості матеріалу. Як приклад наведено розподіл інтенсивності швидкості деформацій (рисунок 4) та інтенсивності напружень (рисунок 5) для сплаву ОТ4 (діаметр робочої частини матриці – 30 мм, радіус ребра – 3 мм, $\psi = 0$). Розподіл напружень для заготовок інших розмірів та матеріалів має аналогічний характер.

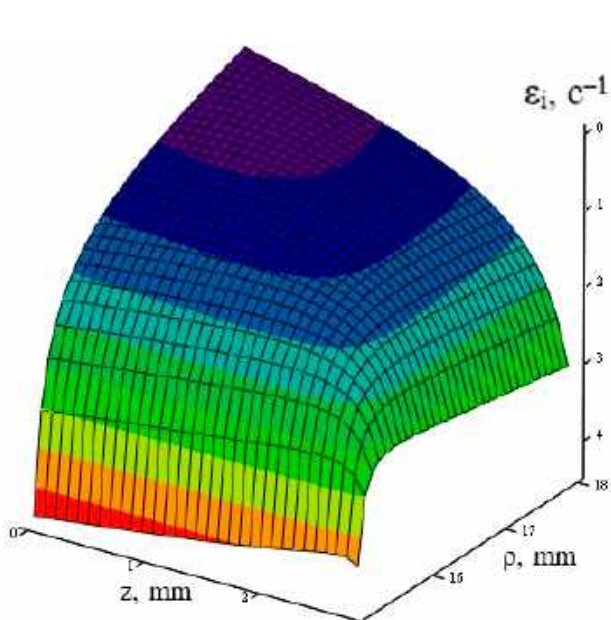


Рисунок 4 – Розрахунковий розподіл інтенсивності швидкості деформацій для сплаву ОТ4 ($\psi = 0$)

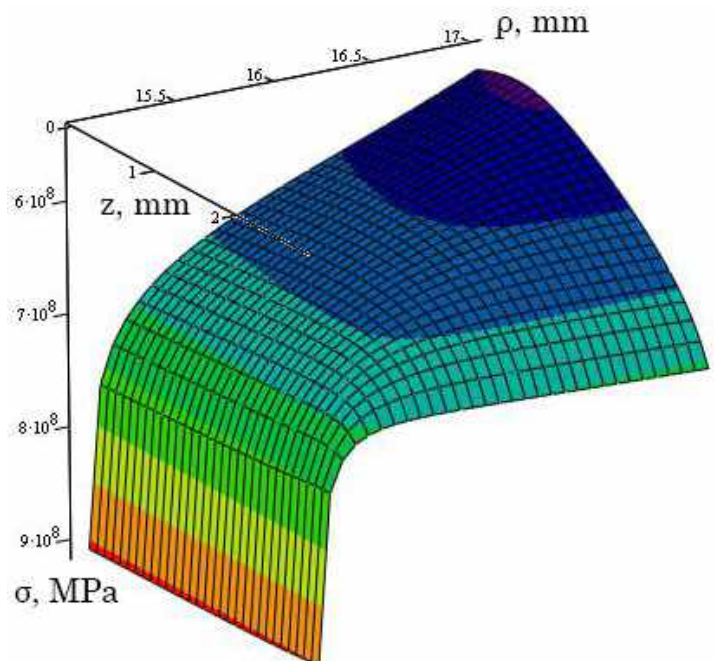


Рисунок 5 – Розрахунковий розподіл інтенсивності напружень для сплаву ОТ4 ($\psi = 0$)

Отримано вираз для розрахунку роботи пластичної деформації металу на перетяжному ребрі

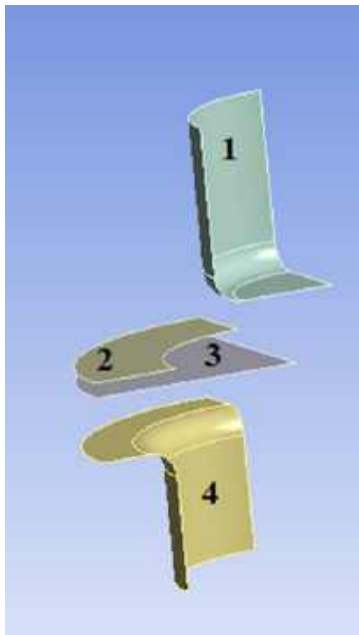
$$A_T = \int_t \int_{R-\sqrt{r_2^2-z^2}}^R m\sigma_t e_i^n \varepsilon_i \rho d\rho \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_2} dz dt - \\ - \int_t \int_{R-\sqrt{r_1^2-z^2}}^R m\sigma_t e_i^n \varepsilon_i \rho d\rho \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_1} dz dt.$$

Досліджено кінематику процесу течії металу на перетяжному ребрі при штампуванні-витягуванні. Отримано системи рівнянь, що описують поля швидкостей переміщень металу, деформацій і швидкостей деформацій в матеріалі деталі на перетяжному ребрі. Визначено функціональний зв'язок між роботою деформування і параметрами режиму штампування на ребрі матриці.

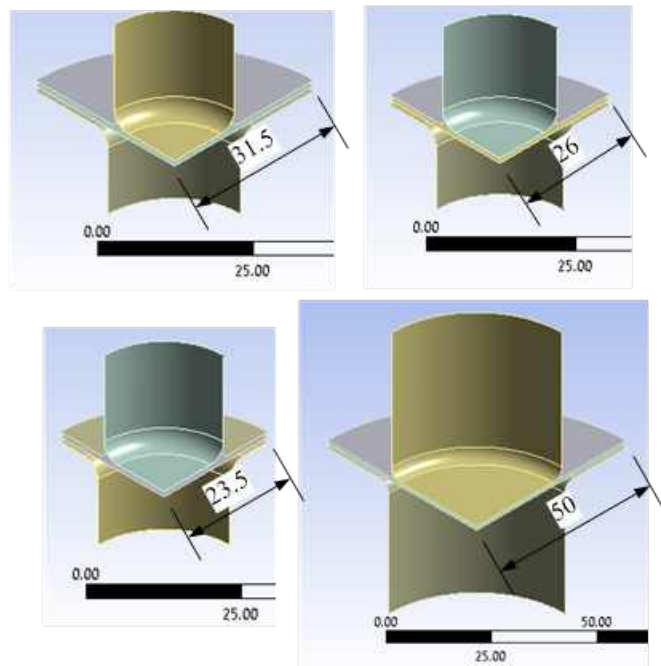
Дані, наведені в розділі 3, опубліковано в роботах [3, 4, 9].

Четвертий розділ присвячено проведенню цифрових та натурних експериментальних досліджень впливу параметрів режиму штампування-витягування на енергосилові характеристики процесу, на якість одержуваних деталей та розробленню рекомендацій щодо розширення технологічних можливостей процесу штампування-витягування деталей авіаційної техніки.

Виконано цифрове моделювання процесу течії металу під час штампування-витягування у програмному комплексі LS-DYNA. У геометричній моделі подано лише поверхні тіл, що беруть участь в операції формування (рисунок 6, а).



а – геометрична модель



б – типорозміри штампів

Рисунок 6 – Досліджувані моделі та їх елементи (1 – пуансон; 2 – притискач; 3 – деталь; 4 – вкладка)

Для уточнення механічних характеристик матеріалів перед моделюванням було проведено випробування зразків на розтяг відповідно до стандарту ДСТУ ISO 6892-1:2019. Для скорочення часу обчислень було враховано симетрію моделі та розглянуто четверту її частину. Розглянуто результати моделювання заготовок чотирьох типорозмірів: 47 мм, 52 мм, 63 мм і 100 мм для матеріалів ОТ4, Д16Т, АМц, АМг при діаметрі робочої частини матриці 30 мм і радіусу ребра 3 мм. (рисунок 6, б).

Порівняємо ізополя інтенсивності напружень, отримані внаслідок цифрового моделювання, та інтенсивності напружень, визначені теоретично запропонованим методом.

Для заготовки діаметром 47 мм зі сплаву ОТ4 результати моделювання процесу штампування-витягування за допомогою LS-DYNA подано на рисунку 7, а результати розрахунку – на рисунку 5. Розподіл напружень для інших діаметрів заготовок та матеріалів аналогічний і відрізняється лише величинами. Як бачимо, максимальне еквівалентне напруження становить 792 МПа, а за розрахунковою моделлю – в межах 800 МПа.

Як і очікувалося, для всіх досліджуваних матеріалів максимальне значення напружень спостерігається на ребрі матриці. Результати моделювання повністю відповідають теоретичним розрахункам. Різниця у напруженнях знаходиться у межах 5...10 % для всіх розглянутих матеріалів та типорозмірів заготовок. Спостерігається незначне зменшення напружень в момент відриву днища. Це пояснюється зменшенням навантаження внаслідок полегшення ходу пуансона.

Для проведення натурного експерименту були підготовлені відповідні заготовки діаметром 47 мм, 52 мм, 63 мм і 100 мм (рисунок 8). Товщина всіх заготовок однакова – 1 мм. Процес витягування проводився у регульованому інструментальному штампі (рисунок 9). Розривне навантаження визначали за допомогою каліброваного манометра.

Експериментальні значення граничного навантаження для всіх чотирьох матеріалів наведено в таблиці 1

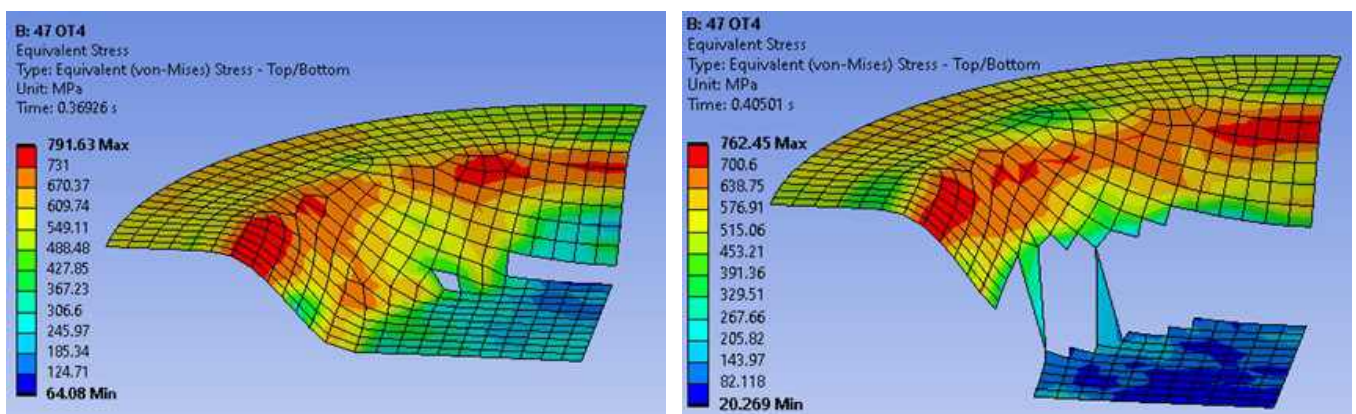


Рисунок 7 – Змодельований розподіл пластичного еквівалентного напруження для сплаву ОТ4 в різний момент часу



Рисунок 8 – Заготовки та деталі після розривного навантаження (зусилля)



Рисунок 9 – Загальний вигляд інструментального штампа

Таблиця 1 – Залежність зусилля витягування від матеріалу заготовки для діаметра 63 мм

№ п/п	Марка матеріалу	Граничне зусилля деформації, Н
1	АМг	14715
2	АМц	7553,7
3	Д16Т	21582
4	ОТ4	49344

Залежність зусилля витягування від ступеня витягування для різних матеріалів показано на рисунку 10. Усі деталі діаметром 100 мм, окрім титану, зазнали руйнування під час процесу штампування-витягування, тому ця частина дослідження не подана для алюмінієвих сплавів.

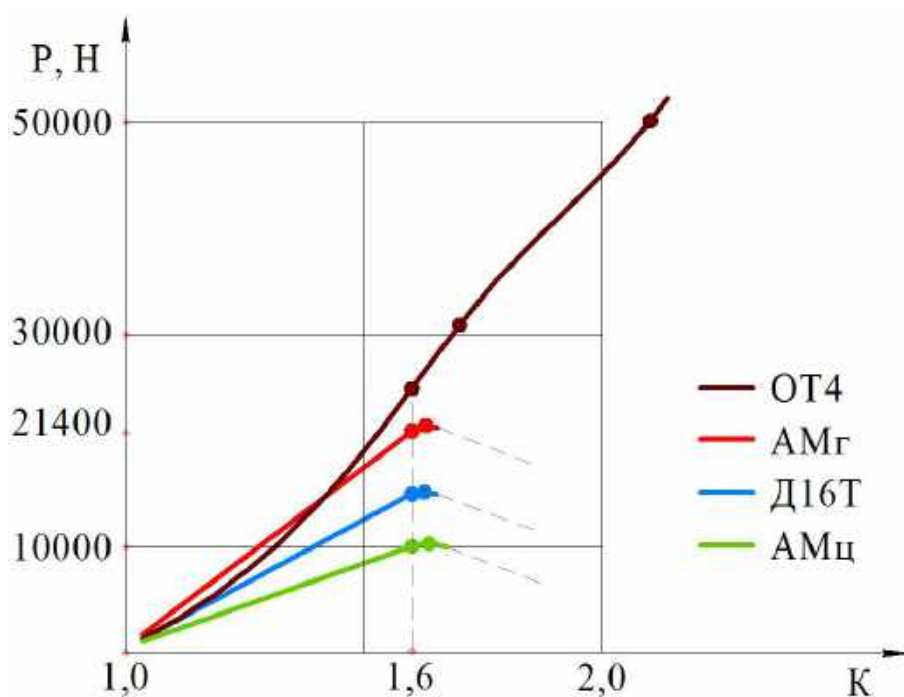


Рисунок 10 – Графік залежності зусилля витягування від ступеня витягування для різних матеріалів

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 штампування-витягуванні титанового сплаву ОТ4 (Ti-Al-Mn), для якого не було встановлено граничну ступень витягування. Визначено граничний ступінь витягування для досліджуваних матеріалів, а саме для сплавів: АМг (Al-Mg) та Д16Т (Al-Cu-Mg) в межах 1,6...1,64; для АМц (Al-Mn) – 1,6...1,7; для ОТ4 (Ti-Al-Mn) – вище за 2,1.

Зауважимо, що процес деформування для пластичних алюмінієвих сплавів ближче до процесу штампування. Крім того, прогнозовані результати випробувань показують, що більш міцні сплави мають значно більші деформації перед руйнуванням, що потребує більших зусиль, а саме руйнування відбувається майже на початку процесу деформації на сформованому дні.

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 вибрано 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 11.

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 12. Для наочності побудуємо графіки розподілу товщини по відповідних ділянках деталей (рисунк 13).

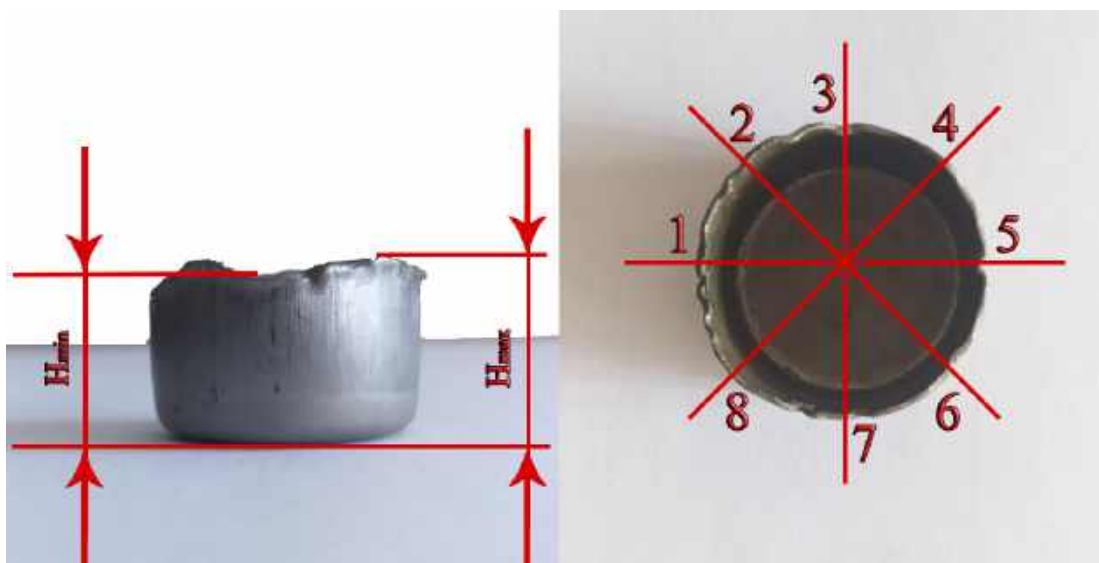


Рисунок 11 – Вимірювання деталей, отриманих штампуванням-витягуванням

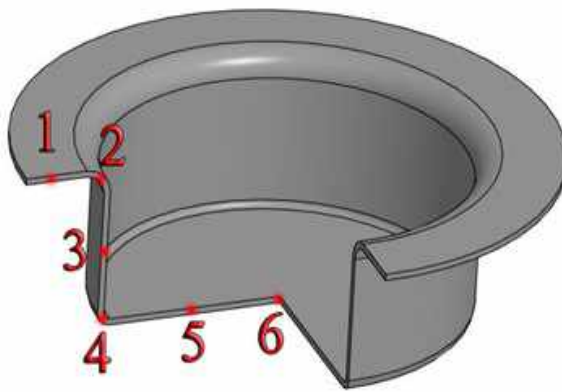


Рисунок 12 – Вимірювання товщини отриманих виробів



Рисунок 13 – Розподіл товщини деталей на відповідних ділянках

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 із заготовкою. 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.

Проведено цифрове моделювання процесу штампування-витягування за допомогою LS-DYNA з перевіркою адекватності цифрових моделей досліджуваних процесів, а також математичних моделей, отриманих при теоретичному дослідженні кінематики течії металу.

Дані, наведені в розділі 4, опубліковано в роботах [3, 9, 10].

У п'ятому розділі наведено рекомендації щодо проектування технологічних процесів виготовлення листових деталей авіадвигуна та розрахунку економічної ефективності.

Спираючись на проведенний комплекс теоретичних та експериментальних досліджень, запропоновано методику 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 проєктування 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 технологічної підготовки штампування-витягування деталей складної геометрії (рисунк 14), в якому вперше враховано просторову картину течії металу на ребрах матриць, що дає додаткову можливість виявляти недоліки пропонованого технологічного процесу та скоротити час на проєктування та виготовлення штампового оснащення, а відповідно і терміни підготовки дрібносерійного виробництва деталей складної форми з листа.



Рисунок 14 – Алгоритм технологічної підготовки виробництва штампування-витягування деталей складної форми

Основною перевагою запропонованого підходу є удосконалення технології штампування-витягування завдяки уточненню впливу технологічних факторів на силові параметри процесу деформування та якісні показники штампованих деталей, що є визначальним фактором для конкурентоспроможності продукції в умовах обмежених матеріальних ресурсів при проєктуванні технологічних процесів листового штампування авіаційних деталей на підприємствах галузі в умовах низької серійності виробів та швидкої зміни їхньої номенклатури.

Для побудови процесів штампування слід вирішити основні технологічні питання: установити характер, кількість, послідовність і суміщеність операцій.

Характер операцій визначається в основному геометричною формою і конфігурацією штампованих деталей, станом їх поверхні, наявністю вирізів або отворів. Внаслідок аналізу конструктивних і технологічних особливостей деталі і розгляду різних схем побудови технологічного процесу були розроблені маршрути виготовлення дефлектора (рисунки 15,16).

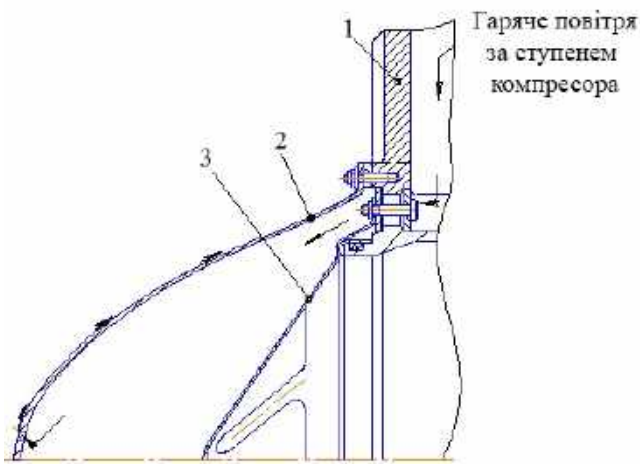


Рисунок 15 – Протиобліднювальна система двигуна Д-136: 1 – силовий стояк; 2 – кок; 3 – дефлектор

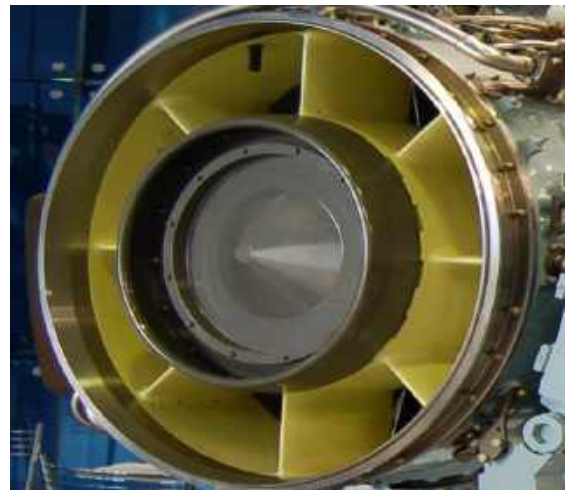


Рисунок 16 – Загальний вигляд вхідного пристрою Д-136

Виготовлення дефлекторів здійснюється на ділянці штампування вибухом, розміщеному в закритому приміщенні.

За базовим та новим варіантом деталі виготовляють за чотири переходи у стаціонарному басейні за допомогою штампа, оснащеного клиновим притискачем фланця заготовки.

Порівнювані варіанти відрізняються за трудомісткістю, оснащенням і капітальними витратами.

Зміна організації виконання робіт дає змогу зменшити тривалість критичного шляху та максимальну кількість виконавців.

У нашому випадку, на етапі оптимізації календарних термінів розглядається технологічна підготовка виробництва в аспекті проєктування технологічного процесу (ТП) та засобів технологічного оснащення безпосередньо ТП та операційного часу виробництва виробу. У зв'язку зі значним спрощенням завдання розрахунку відпадає необхідність пов'язувати виконання комплексу робіт та розрахунки резерву часу, а безпосередній ефект від упровадження запропонованого алгоритму можна відобразити у вигляді таблиці 1. Встановлено, що новий техноло-

гічний 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.

Таблиця 1 – 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%

Запропоновано алгоритм проектування ТП, в якому акцентовано увагу на дослідженні кінематики течії металу на ребрах матриць, що дає змогу на етапі розроблення виявити недоліки проектного ТП та скоротити час переходу до робочого процесу з одночасною економією коштовних матеріалів, які широко використовуються в авіаційній галузі.

Спроектовано ТП штампування-витягування листової деталі авіадвигуна (дефлектор) з плоскої заготовки з урахуванням течії металу на ребрах матриць.

На підставі спроектованого ТП виготовлення дефлектора виконано розрахунок економічної ефективності, який показав, що для розглянутої деталі застосування розробленого ТП має значні переваги порівняно з базовим.

Дані, наведені у розділі 5, опубліковано у роботах [1, 6, 8, 12].

ВИСНОВКИ

Відповідно до поставленої мети в дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу удосконалення технології штампування-витягування завдяки уточненню впливу технологічних факторів на силові параметри процесу деформування та якісні показники штампованих деталей. Отримано такі наукові та практичні результати:

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. Визначено 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 по-

вного 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 квалітетам 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 НАУКОВИХ ПРАЦЬ 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**

АНОТАЦІЯ

Онопченко А. В. Удосконалення технології штампування-витягування авіаційних деталей складної форми з урахуванням кінематики течії металу на ребрах матриць. – 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 «Харківський авіаційний інститут», МОН України, 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.

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.

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.

Розроблено 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 при формоутворенні деталей складної форми.

Запропоновано алгоритм технологічної підготовки штампування-витягування деталей складної геометрії, в якому вперше враховано просторову картину течії металу на ребрах матриць, що дає додаткову можливість виявляти недоліки запропонованого технологічного процесу та скоротити час на проектування та виготовлення штампового оснащення, а відповідно і терміни підготовки

дрібносерійного виробництва.

Подано результати цифрового моделювання процесу штампування-витягування в LS-DYNA, які повністю відповідають теоретичним розрахункам та натурному експерименту.

В експериментальній частині роботи проведено дослідження впливу параметрів режимів штампування-витягування на якість одержуваних деталей для трьох алюмінієвих та одного титанового сплаву.

Розроблено рекомендації щодо удосконалення й розширення технологічних режимів штампування-витягування алюмінієвих та титанових сплавів.

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

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.

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.

The kinematics of the metal flow has been investigated in the metal stamping-drawing at the dies corners. Systems of equations describing the fields of metal movement speeds, strain rate and deformations in the material of the part at the dies corners during stamping-drawing were obtained. A correlation between the deformation work and parameters of the processing mode at the dies corners has been established.

The results of numerical simulation of the stamping-drawing process have presented in LS-DYNA. 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 experimental part of work, 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.

Recommendations for expanding technological capabilities of the stamping-drawing process aluminium and titanium alloys have been developed.

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

Підписано до друку 04.06.2025
Формат 60×84 1/16. Папір офс. Офс. друк
Ум. друк. арк. 1,2. Наклад 100 пр. Замовлення № 106-25

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»
61070, м. Харків-70, вул. Вадима Манька, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр «ХАІ»
61070, м. Харків-70, вул. Вадима Манька, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001