

**Національний технічний університет України  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені Ігоря Сікорського»**

НАВЧАЛЬНО - НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ  
Кафедра технології машинобудування

«На правах рукопису»  
УДК 621.7

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
Олександр Охріменко  
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

“ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-науковою програмою «Технології машинобудування»**

**зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»**

на тему: Магнітно-імпульсна обробка деталей авіаційної промисловості

Виконав: Єлін Володимир Володимирович

студент 6 курсу, групи МТ-21мп

Єлін Володимир Володимирович  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент, к. т. н., Медведєв В. В.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2023 рік

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Навчально – науковий механіко-машинобудівний інститут**  
**Кафедра технології машинобудування**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-науковою програмою «Технології машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Олександр Охріменко

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

Єліну Володимиру Володимировичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Магнітно-імпульсна обробка деталей авіаційної промисловості»

науковий керівник Медведєв Вадим Вячеславович, доцент, к. т. н.,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «21» березня 2023р. № 1293-с

2. Термін подання студентом дисертації «16» жовтня 2023 р.

3. Об'єкт дослідження Технологічний процес виготовлення нервюри крила літака АН-26 з використанням магнітно-імпульсної обробки

4. Вихідні дані Ескіз з розмірами нервюри крила літака АН-26

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Описати теоретичні аспекти принципу роботи МІУ та визначити основні переваги та недоліки МІО.
2. Розробити технологічний процес вироблення нервюри літака АН-26 і визначити місця, які потребують МІО, шляхом комп'ютерного

моделювання та міцностного розрахунку. Розрахувати оптимальні параметри для МІО

3. Оцінити економічну ефективність даного типу технології обробки
4. Розробити стартап проєкт.
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу
  - Огляд актуальності теми: 2-3 слайдів Microsoft PowerPoint;
  - Розробка технологічного процесу: 2-3 слайда Microsoft PowerPoint;
  - Визначення зон деталі для використання МІО, розрахунок оптимальних параметрів та створення моделей індукторів: 4-6 слайдів Microsoft PowerPoint;
  - Оцінка економічної ефективності та розробка стартап проєкту: 2-3 слайди Microsoft PowerPoint;
  - Загальні висновки по роботі: 1 слайд.
7. Орієнтовний перелік публікацій публікація 1 статті
8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Термін виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------|
| 1     | Огляд актуальності теми                         | 21.08.23 – 01.09.23                              |          |
| 2     | Розробка технологічного процесу                 | 2.09.23 – 14.09.23                               |          |
| 3     | Визначення зон використання МІО                 | 15.09.23 – 21.09.23                              |          |
| 4     | Розрахунок параметрів та створення індукторів   | 22.09.23 – 01.10.23                              |          |
| 5     | Оцінка економічної ефективності                 | 02.10.23 – 07.10.23                              |          |
| 6     | Розробка стартап проєкту                        | 08.10.23 – 12.10.23                              |          |
| 7     | Підготовка презентації                          | 16.10.23 – 20.10.23                              |          |

Студент

Володимир, ЄЛІН

Науковий керівник

Вадим, МЕДВЕДЄВ

## Анотація

Магістерська дисертація містить: 92 ст., 17 рисунків, 25 таблиць, 19 джерел.

Актуальність теми. Авіаційна промисловість є однією з найбільш технологічно вимогливих і стратегічних галузей глобальної економіки. Завдяки постійному росту попиту на авіаційні продукти та необхідності зниження ваги та підвищення міцності деталей, дослідження нових технологій обробки і матеріалів стає вельми важливим завданням.

Магнітно-імпульсна обробка є однією з багатообіцяючих технологій в авіаційній промисловості, яка може принести значні покращення в якості та продуктивності виробництва. Ця технологія використовується для підвищення міцності та зносостійкості деталей, що дозволяє підвищити їхню тривалість служби та зменшити ризик аварійних ситуацій.

Застосування магнітно-імпульсної обробки також дозволяє знизити вплив негативних факторів навколишнього середовища, оскільки цей процес відбувається без використання агресивних хімічних речовин і допомагає зменшити відходи виробництва.

Окрім того, враховуючи зростання конкуренції в авіаційній промисловості, важливим є і пошук шляхів оптимізації виробництва та зниження витрат.

Магнітно-імпульсна обробка може допомогти досягти цих цілей, підвищуючи продуктивність і зменшуючи кількість бракованих виробів.

Виходячи з викладеного вище, дослідження теми магнітно-імпульсної обробки деталей авіаційної промисловості спрямоване на вдосконалення технологічних процесів та підвищення конкурентоспроможності підприємств цієї галузі, що має стратегічне значення для авіаційної індустрії та економіки в цілому.

Мета дослідження: зменшення дефектів та залишкових напружень, покращення механічних властивостей та підвищення точності обробки деталей авіаційної промисловості.

Об'єкт дослідження: технологічний процес виготовлення нервюри крила літака АН-26 при використанні технологій МІО.

Предмет дослідження: вплив магнітно-імпульсної обробки деталей авіаційної промисловості на їх конструктивні та технологічні параметри.

Методи дослідження: порівняння, аналіз, комп'ютерне моделювання.

Практичне значення одержаних результатів: Результати цієї роботи можуть бути запроваджені в виробництві деталей авіаційної промисловості, що в свою чергу зможе дати змогу розробляти нові або покращувати характеристики вже існуючих моделей літаків

Публікації. За результатами досліджень опубліковано статтю:

Магнітно-Імпульсна обробка деталей авіаційної промисловості / В. В.

Медведєв, В. В. Єлін. // Збірник наукових праць МНК «Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування» // Collection of scientific papers of the IYS «Young science - robotics and nano-technology of modern mechanical engineering» - С. 96–100.

Ключові слова: Магнітно-імпульсна обробка, дефекти, залишкові напруження, механічні властивості, авіаційна промисловість.

## Abstract

Master's thesis contains: 92 pages, 17 figures, 25 tables, 19 sources.

Relevance of the topic. The aviation industry is one of the most technologically demanding and strategic sectors of the global economy. Due to the constant growth in demand for aviation products and the need to reduce weight and increase the strength of parts, the study of new processing technologies and materials is becoming a very important task.

Magnetic pulse machining is one of the promising technologies in the aviation industry that can bring significant improvements in quality and productivity. This technology is used to increase the strength and wear resistance of parts, which increases their service life and reduces the risk of accidents.

The use of magnetic pulse processing also helps to reduce the impact of negative environmental factors, as this process takes place without the use of aggressive chemicals and helps to reduce production waste.

In addition, given the growing competition in the aviation industry, it is important to find ways to optimize production and reduce costs. Magnetic pulse machining can help achieve these goals by increasing productivity and reducing the number of defective products.

Based on the above, the study of the topic of magnetic pulse machining of aviation industry parts is aimed at improving technological processes and increasing the competitiveness of enterprises in this industry, which is of strategic importance for the aviation industry and the economy as a whole.

Purpose of the study: to reduce defects and residual stresses, improve mechanical properties and increase the machining accuracy of aircraft parts.

Object of research: technological process of manufacturing the AN-26 airplane wing rib using MPM technologies.

Subject of research: the effect of magnetic pulse processing of aviation industry parts on their design and technological parameters.

Research methods: comparison, analysis, computer modeling.

Practical significance of the results: The results of this work can be implemented in the production of aviation industry parts, which in turn will allow to develop new or improve the characteristics of existing aircraft models.

Publications. An article was published based on the results of the research:

Magnetic-pulse machining of parts of the aviation industry / V. V. Medvedev, V. V. Yelin // Collection of scientific papers of the IYS «Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування» - Р. 96-100.

Keywords: Magnetic pulse machining, defects, residual stresses, mechanical properties, aviation industry.

# ЗМІСТ

|                                                                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВСТУП .....</b>                                                                                                             | <b>9</b>  |
| <b>РОЗДІЛ 1. Теоретичні аспекти магнітно-імпульсної обробки .....</b>                                                          | <b>13</b> |
| 1.1. Основне поняття, принцип дії та установки для магнітно-імпульсної обробки .....                                           | 13        |
| 1.2. Обладнання, методи проведення, технологічні схеми та основні види магнітно-імпульсної обробки .....                       | 22        |
| 1.3. Переваги, недоліки та вплив на матеріал магнітно-імпульсної обробки .....                                                 | 30        |
| <b>РОЗДІЛ 2. Застосування МІО в авіаційної промисловості .....</b>                                                             | <b>34</b> |
| 2.1. Можливі області застосування магнітно-імпульсної обробки. МІО в авіаційної промисловості .....                            | 34        |
| 2.2. Конструкторські та технологічні властивості нервюри крила літака АН-26.....                                               | 37        |
| 2.3. Особливості матеріалу застосовуваного для виготовлення нервюри .....                                                      | 42        |
| 2.4 Міцностний розрахунок нервюри крила літака АН 26 .....                                                                     | 49        |
| 2.5 Визначення оптимальних параметрів для МІО та розробка рекомендацій щодо застосування даної технології на виробництві ..... | 61        |
| <b>РОЗДІЛ 3. Економічна ефективність застосування МІО в авіаційної промисловості.....</b>                                      | <b>69</b> |
| 3.1 Аналіз нового варіанту технології виробництва.....                                                                         | 69        |
| 3.2 Техніко-економічне обґрунтування застосуванню МІО.....                                                                     | 70        |
| <b>РОЗДІЛ 4. Розробка стартап-проекту .....</b>                                                                                | <b>75</b> |
| 4.1 Опис ідеї стартап-проекту .....                                                                                            | 75        |
| 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту .....                                                                                     | 78        |
| 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....                                                                  | 79        |
| 4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту .....                                                                               | 86        |
| 4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....                                                                    | 88        |
| <b>ВИСНОВКИ .....</b>                                                                                                          | <b>91</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>                                                                                         | <b>93</b> |

## ВСТУП

В сучасному світі інновації та передові технології виробництва є ключовими факторами успіху в промисловому виробництві. Однією з таких передових технологій є магнітно-імпульсна обробка деталей, яка здійснює величезний вплив на властивості матеріалів та деталей у різних галузях промисловості. Відмінною особливістю цього методу є його висока ефективність та можливість застосування в різних сферах, включаючи авіаційну промисловість.

Авіаційна промисловість завжди була ключовою складовою сучасного світу, забезпечуючи швидкі, безпечні та надійні перевезення пасажирів і вантажів. За останні десятиліття вимоги до безпеки, надійності та ефективності літаків значно зросли, а це вимагає постійного покращення технологій і процесів виробництва.

Магнітно-імпульсна обробка (МІО) є однією зі спеціалізованих обробляючих технологій, яка має потенціал змінити підхід до виготовлення та обробки деталей для авіаційного виробництва. Ця техніка, яка полягає в застосуванні магнітних імпульсів для обробки матеріалів, може вплинути на підвищення якості, міцності та довговічності компонентів, що використовуються у літаках. Водночас МІО може зменшити витрати часу і енергії, покращити точність і знизити вплив на навколишнє середовище порівняно з іншими технологіями обробки.

Актуальність дослідження даної теми полягає в тому, що вона може відкрити нові можливості для підвищення якості та конкурентоспроможності авіаційних компонентів, а також сприяти збереженню ресурсів і зниженню витрат виробництва. Це дослідження має на меті проаналізувати потенціал МІО для авіаційної промисловості, вивчити його технічні аспекти та визначити можливість впровадження цієї технології в практику виробництва авіаційних компонентів.

У цьому контексті, магістерська дисертація спрямована на вивчення та вдосконалення МІО для потреб авіаційного виробництва, а також на встановлення ефективності цієї технології в плані підвищення якості та надійності авіаційних деталей. Дослідження проводитиметься в контексті сучасних вимог до безпеки та вимог до підвищення продуктивності в авіаційній промисловості.

Об'єкт дослідження – магнітно-імпульсна обробка.

Предмет дослідження цієї магістерської дисертації є магнітно-імпульсна обробка деталей авіаційної промисловості.

Не менш важливим елементом дисертації є мета дослідження, а саме те, що має бути досягнуто. Мета даної роботи полягає у характеристиці та можливості застосуванні магнітно-імпульсної обробки деталей в авіаційній промисловості.

Відповідно до поставленої мети, впливають такі завдання, які необхідно вирішити для досягнення мети:

1. Описати всі теоретичні аспекти цього виду обробки;
2. Розглянути можливості застосування МІО в авіаційної промисловості на прикладі деталей нервюри;
3. Провести розрахунки характеристик деталей до застосування МІО та після;
4. Визначити оптимальні параметри для МІО та розробити рекомендації щодо застосування даної технології на виробництві;
5. Оцінити економічну ефективність цієї технології;

Ступінь наукової розробленості проблеми. Магнітно-імпульсна обробка (МІО) є більш технічною і прикладною областю, і багато досліджень та публікацій у цій області мають інженерний та технічний спрямування (Малигін Б. В., Глущенко В.А., Карпухін В.Ф., Нікітін К.В., Нікітін В.І., Тимошкін І.Ю.,

Ковалевский С. В., Тулупов В. И., Білий І.В., Фертік С.М., Хіменко Л.Т. та інші).

Теоретичною основою дослідження послужили вітчизняні та зарубіжні публікації з досліджуваної та суміжних проблем, документи методичного характеру: положення, методичні вказівки. При написанні магістерської дисертації було використано наукову, навчальну, методичну, нормативно-довідкову та іншу літературу.

Методологічну основу дослідження становили такі методи: аналіз даних, порівняльний аналіз, статистика, порівняльний, літературний огляд, експериментальний підхід та аналіз вартості.

Емпіричною базою роботи є документи, технічні креслення, звіти та архівні дані, матеріали періодичного друку та глобальної мережі Інтернет, дані опубліковані у статтях, монографіях, публікаціях, проаналізовані та узагальнені в роботі.

Нормативна база дослідження є важливою складовою магістерської дисертації, оскільки вона надає законодавчу, стандартну та регуляторну основу для дослідження, допомагає забезпечити виконання досліджень у відповідності з встановленими нормами та правилами. Нормативна база цієї роботи складається зі основних стандартів, норм, самого законодавства України, яке стосується авіаційної безпеки, стандартів якості, сертифікації та інших аспектів, а також технічних рекомендації та постанов.

Науково-практична значимість роботи полягає в тому, що висновки та пропозиції, що містяться в ній можуть мати позитивні впливи на авіаційну промисловість, а також загалом на виробництво та саму технологію виробництва. Загалом, науково-практична значимість полягає в можливості внести важливий внесок у розвиток та вдосконалення авіаційної промисловості, її технологій та виробництва, що може мати позитивний вплив на цю галузь і суспільство в цілому.

Ця робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури.

## **РОЗДІЛ 1. Теоретичні аспекти магнітно-імпульсної обробки**

### **1.1 Основне поняття, принцип дії та установки для магнітно-імпульсної обробки**

Магнітно-імпульсна обробка (МІО) – це технологія обробки матеріалів, що базується на використанні імпульсних магнітних полів для зміни структури, властивостей та поведінки матеріалів. Вона включає в себе застосування коротких інтенсивних магнітних полів, які впливають на мікроструктуру та макроструктуру матеріалів, що піддаються обробці.

МІО є відносно новою технологією, яка розвивалася в другій половині 20 століття. Вона народилася завдяки дослідженням і відкриттям у галузі магнетизму та впливу магнітних полів на властивості матеріалів.

Одним із ключових відкриттів, що лягло в основу МІО, було явище магнітного об'ємного згортання (MagnetoVolumetric Contraction), яке було вперше описано в літературі у 1968 році. Це явище полягає в зміні об'єму матеріалу під впливом магнітного поля. Це відкриття стало основою для подальших досліджень та розробки МІО.

Перші дослідження в галузі МІО проводилися в СРСР, і сам метод був розроблений в рамках наукових досліджень вченими в цій країні. Поступово МІО стала об'єктом інтересу для вчених та інженерів в інших країнах, і вона знайшла застосування в різних галузях промисловості та науки.

З 1970-х років використання магнітно-імпульсної обробки (МІО) значно розширилося з метою підвищення довговічності та надійності деталей машин; Малигін Б. В. активно займався МІО ріжучого інструменту, протяжок, симетричних деталей (валів, осей, підшипників, клапанів, штовхачів, штоків і т. д.), Розроблено різні технології магнітної обробки коліс, зубчастих коліс, великогабаритних деталей, сталевих тросів, канатів, черв'ячних передач і косозубих деталей. Технологія заснована на тому, що компоненти поміщаються в порожнину електромагніту і матеріал компонентів впливає на магнітне поле

пристрою шляхом взаємної індукції. Датчики аналізують параметри, а інформація надсилається на міні-комп'ютер, який створює програму для обробки МЕМ. Потім розмагнічувач вмикає електричні ланцюги блоку живлення установки, і заготовка обробляється в імпульсному магнітному полі із заданими параметрами імпульсу. Розроблено та впроваджено у виробництво дослідно-промислові установки: ВНІМІ, ЕМО, МІУРІ, УМОІ-50, Імпульс-3М, БУР-83 та Контакт.

Вчені Національного Харківського політехнічного університету працюють над проблемою магнітно-імпульсної обробки металів з 1963 року. За ці роки співробітники розробили понад 30 різних магнітно-імпульсних обробних верстатів (МІУ), а річний економічний ефект від встановлення одного МІУ в середньому становив 30 000 у.о..

Верстат МІУ-20 був створений наприкінці 1964 року і став першим промисловим агрегатом, розробленим в ХПІ. Верстат МІУ-20 був першим промисловим агрегатом, розробленим в ХПІ наприкінці 1964 року. Так, були впроваджені МІУ-20/1, МІУ-20/2, МІУ-20/3, МІУ-20/4, МІУ-20/5, МІУ-20/6 та інші вдосконалені версії; МІУ-20/1 використовувався на Авіаційному заводі (м. Київ) для виробництва перехідних фітингів і річний економічний ефект від його впровадження склав 20 000 у період з 1967 по 1969 рр. магнітно-імпульсні установки МІУ-20/2 були впроваджені на ряді заводів і підприємств: на Харківському заводі транспортного машинобудування ім. В.О. Малишева для буріння, в Морфізприладі (м. Ленінград) для калібрування. На підприємстві використовувалися для (Ленінград) для калібрування титанових труб (річний економічний ефект від впровадження - у.о.); зварювання труб з різних матеріалів для побутових холодильників на Заводі радіорелейної апаратури (Дніпропетровськ) (річний економічний ефект - 25 000 у.о.); виготовлення деталей на Машинобудівному заводі (Куйбишев). Виготовлення деталей різної форми з трубної та листової заготовки на машинобудівному заводі (Куйбишев)

(річний економічний ефект 30 000 у.о.); пресування спеціальних кабельних наконечників з бронзи на машинобудівному заводі (річний економічний ефект 7 500 у.о.); Лихачов, Москва. зварює алюмінієві та мідні труби (річний економічний ефект - 20 000 у.о.), та на інших відомих підприємствах.

Машина МІУ-6, розроблена в 1966 році, використовувалася для обтиску гайок і виготовлення ущільнень на автоматичній виробничій лінії на авіаційному заводі (Харків). Впровадження цього обладнання дало економічний ефект 10 000 у.о. на рік.

Дослідно-промислова установка МІУ-50 була побудована в 1968 році в Харківському політехнічному інституті і впроваджена на підприємстві а/с В-2289 (м. Дніпропетровськ), що займається складанням і реалізацією алюмінієвих труб (річний ефект від впровадження 30 000 у.о.). Удосконалена установка МІУ-50/1 впроваджена на заводі "Прогрес" (м. Куйбишев) для виготовлення деталей різної форми з трубних і листових заготовок кольорових металів (економічний ефект від впровадження установки склав 40 000 у.о.). Установка призначена для магнітно-імпульсного очищення коронуючих електродів електрофільтрів. Установка впроваджена для очищення коронуючих електродів горизонтальних електрофільтрів від шару пилу при заданих температурних параметрах.

Магнітно-імпульсна установка МІУ-30 була виготовлена в травні 1989 року і призначена для зварювання, складання, штампування, свердління і волочіння різних металообробних процесів. Установка була впроваджена для очищення цементовозів від залишків бетону на зовнішніх і внутрішніх поверхнях деталей вагонів за допомогою магнітного поля. У співпраці з Харківською асоціацією інженерів залізничного транспорту були проведені випробування на вагонах з різним ступенем забруднення. Результати цих випробувань дозволили якісно оцінити очищення від бетоноподібних залишків.

Сучасні розробки в області обробки поверхонь імпульсними магнітними полями (ІМП) представлені в наукових працях Ковалевського. У статті розглядається схема обробки центрально встановлених обертових деталей за допомогою пристрою фокусування імпульсного магнітного поля (ПМП), встановленого на тримачі інструменту токарного верстата. Також описано структуру ПФМК і процеси, що відбуваються при обробці: впровадження обробки поверхні ІМП зменшує залишкові напруження в деталі після обробки, знижує втомні напруження на поверхні деталі після експлуатації і покращує втомну міцність.

З розвитком технології і подальшими дослідженнями були розроблені різні методи і варіанти МІО для різних матеріалів та завдань. Вона продовжує розвиватися і застосовується в сучасних дослідженнях та промисловості для покращення властивостей матеріалів та створення нових технологій і продуктів.

МІО є важливою галуззю наукових досліджень та інновацій, і центри, які займаються МІО, розташовані у різних країнах світу. Деякі з найвідоміших центрів досліджень МІО включають:

1. США: У Сполучених Штатах існують багато університетських та дослідницьких центрів, які спеціалізуються на МІО. Наприклад, Лабораторія з прикладних суперпровідників та електроніки (Applied Superconductivity and Electronics Laboratory) в Каліфорнійському технологічному інституті (Caltech) та Міжнародний центр впровадження магнітно-імпульсної обробки (International Field Enhanced Sintering Center) в Технологічному університеті Стенфорда (Stanford University).

2. Китай: Китай також активно досліджує та розвиває технології МІО. Університети, такі як Пекінський університет і Тсінхуа Університет, мають відомі дослідницькі групи у цій області.

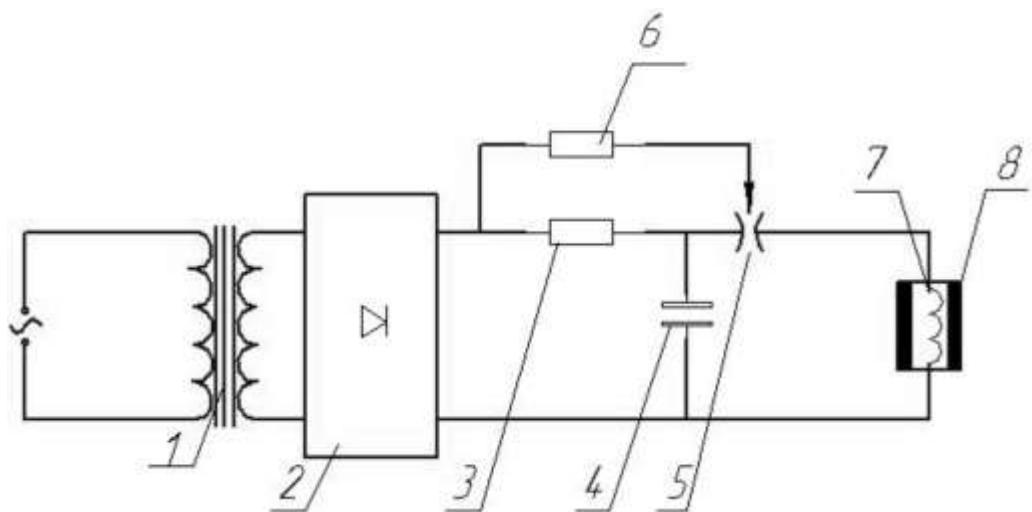
3. Європейський союз: У багатьох країнах Європейського союзу також існують дослідницькі центри та лабораторії, які займаються МІО. Наприклад, Інститут металургії та матеріалознавства Макса Планка в Німеччині.

4. Україна: Україна також має свої наукові центри, які досліджують МІО. В Україні активно працюють вчені та інженери в цій області.

Ці центри проводять дослідження, розробляють нові методи МІО та співпрацюють з промисловими партнерами для впровадження цих технологій у виробництво. Магнітно-імпульсна обробка є важливою галуззю для розвитку матеріалознавства та виробництва матеріалів з покращеними властивостями, і ці центри грають ключову роль у її розвитку.

Процес магнітно-імпульсної обробки матеріалів (МІОМ) заснований на перетворенні електричної енергії, запасеної в накопичувачі, в змінне магнітне поле, що виконує роботу пластичної деформації заготівлі або тверде тіло, що розганяє. Переважна більшість магнітно-імпульсних установок (МІУ) має ємнісний накопичувач енергії – батарею конденсаторів.

Принципова схема установки з ємнісним накопичувачем енергії показано на малюнку 1.



**Рисунок 1** – Принципова схема магнітно-імпульсної установки:

1 – підвищує трансформатор; 2 – випрямляч; 3 – зарядний опір; 4 – батарея конденсаторів; 5 – комутатор; 6 – блок управління; 7 – індуктор; 8 – деталь

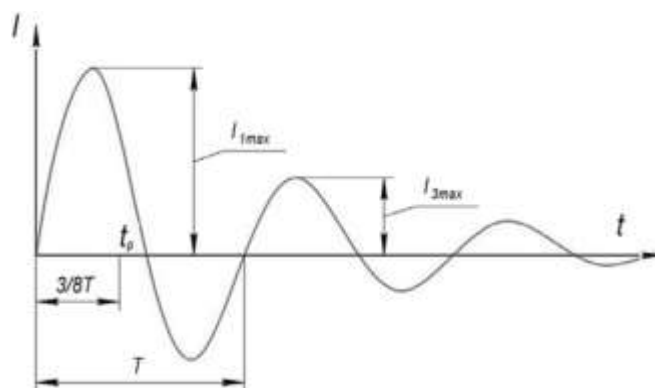
При включенні установки в мережу конденсаторна батарея 4 за допомогою зарядно-випрямлювального пристрою, що включає в себе підвищує трансформатор 1, випрямляч 2 і зарядний опір 3, заряджається до заданого регулятором напруги 6, що становить від одиниць до десятків тисяч вольт. Енергія  $W$ , запасена в батареї конденсаторів, дорівнює:

$$W = (CU^2)/2,$$

де  $C$  – ємність батареї конденсаторів МІУ;

$U$  – напруга заряду.

Після досягнення на конденсаторній батареї заданого напруги на запалювальний електрод триелектродного розрядника 5 від блоку управління 6 подається запалюючий імпульс, ініціює електричний пробій робочого проміжку розрядника і комутуючий розрядний ланцюг. При протіканні по індуктору 7 імпульсу струму навколо індуктора створюється змінне магнітне поле, яке наводить в оброблюваній заготовці 8, виготовлений з електропровідного матеріалу, вихрові струми, що мають зворотний по відношенню до струму індуктора напрямок. Отже цю систему можна розглядати як трансформатор, у якого як первинної обмотки виступає індуктор, а заготівля є вторинною обмоткою. Струм, що протікає в розрядному ланцюзі магнітно-імпульсної установки, має характер синусоїди, що затухає, представленої на малюнку 2.



**Рисунок 2** – Характер зміни розрядного струму  $I$  за часом  $t$

Тривалість імпульсу струму вибирається у однієї тисячної частки секунди. Отже потужність, що виділяється в розрядному ланцюзі, багаторазово перевищує значення, що споживається з мережі живлення. Частота коливань розрядного струму

$$F = 1/T,$$

де  $T$  – період коливань струму для процесів магнітно-імпульсної обробки зазвичай становить величину від 5 до 50 кГц.

Внаслідок закону близькості струми в індукторі та заготівлі стягуються до поверхонь, звернених один до одного. Ступінь проникнення магнітного поля в провідне середовище характеризується величиною скін-шару. Він дорівнює відстані від поверхні провідного середовища до відстані, на якому амплітуда струму зменшується в « $e$ » разів. Величина скін-шару тим менша, чим нижчий питомий електричний опір матеріалу і вища частота коливань розрядного струму.

Два паралельні провідники з струмами протилежних напрямків відштовхуються, взаємодіють між собою магнітні поля струмів в індукторі і в заготівлі.

Силовий вплив на оброблювану заготівлю з боку індуктора здійснюється дистанційно, тобто без механічного або електричного контакту між інструментом і заготовкою, що обробляється. Це явище суттєво відрізняє процес магнітно-імпульсної обробки від інших статичних та імпульсних методів обробки металів тиском і дозволяє деформувати деталі, що мають поліровані, забарвлені або з яким-небудь покриттям поверхні, обробляти імпульсним магнітним полем розплави металів, а також обробляти об'єкти, поміщені в контейнери з вакуумом або з контрольованою атмосферою.

Сила взаємодії провідників збільшується в міру зростання сили струму в провідниках і зменшення відстані між ними.

Крім того, ефективність силового впливу на заготівлю при магнітно-імпульсній обробці істотно залежить від електропровідності оброблюваного матеріалу. Найбільш переважно використовувати метод для обробки матеріалів з високою електропровідністю, наприклад алюмінієвих або мідних сплавів.

Батарея конденсаторів магнітно-імпульсної установки заряджається до напруги, що становить 5-20 тисяч вольт, тому мінімальна величина ізоляційного зазору між заготівлею і індуктором визначається електричною міцністю ізоляції індуктора.

Крім того, індуктор повинен мати захисний шар, що охороняє ізоляцію від механічних пошкоджень, і забезпечує можливість обробки будь-якої заготівлі, що має розміри в полі допуску при обробці циліндричних деталей. Насправді величина ізоляційного зазору між індуктором і заготівлею становить  $\delta = 1,5 \dots 3$  мм.

Оскільки струми в індукторі та заготівлі розподіляються за їхньою товщиною, то електродинамічні сили взаємодії індуктора та заготівлі мають

об'ємний характер. Силовий вплив на заготовку з боку індуктора характеризується величиною тиску імпульсного магнітного поля, яка дорівнює сумі електродинамічних сил, що діють на заготівлю, віднесена до одиниці поверхні заготівлі. Залежність тиску магнітного поля на заготівлю від часу має характер квадратичної синусоїди, що загасає. Амплітудне значення тиску імпульсного магнітного поля на заготівлю  $P_m$  визначається виразом:

$$P_m = M_0 / 2 (H_{m1}^2 - H_{m2}^2),$$

де  $H_{m1}$  і  $H_{m2}$  – напруженість магнітного поля в зазорі «індуктор – заготівля» і проник через заготівлю – відповідно.

Якщо товщина заготівлі  $s$  перевищує величину скін-шару в заготівлі, то у формулі  $H_{m2} = 0$ . Якщо товщина заготівлі менше величини скін-шару, то при підльоті заготовки до металевої матриці проникне через заготівлю магнітне поле піддається стиску і надає протитиск на заготівлю, що перешкоджає оформленню заготівлі по матриці. Це в літературі називають «ефектом магнітної подушки». Для зниження негативного впливу проникнення магнітного поля через стінку заготовки слід забезпечувати таку частоту розрядного струму, при якій скін-шар у заготівлі менше її товщини, або використовувати матриці, виготовлені з діелектричних матеріалів.

Для створення електродинамічних сил, здатних деформувати оброблювану заготівлю, необхідно забезпечити протікання по індуктору струму силою порядку десятків і сотень тисяч ампер. Природно, що з перебігу настільки потужних струмів в індукторі і заготівлі виділяється тепло. Отже, при магнітно-імпульсній обробці силовий вплив на заготівлю супроводжується її нагріванням. Температура нагріву заготовки визначається характеристиками розрядного струму, товщиною заготовки і фізичними властивостями матеріалу,

з якого вона виготовлена. Слід пам'ятати, що тепло виділяється у скін-шарі. Тому під час протікання імпульсу струму приповерхневі шари заготовки, звернені до індуктора, і робоча поверхня індуктора можуть нагріватися до високих температур. Надалі за рахунок теплопровідності відбувається перерозподіл тепла по всьому об'єму індуктора та заготівлі. При обробці заготовок з алюмінієвих сплавів температура заготовки після знімання її з оснастки зазвичай менше 100°C.

Джерелом тепла в заготівлі є також деформаційний нагрівання, тобто перехід частини роботи деформації заготівлі в тепло за відсутності теплообміну з навколишнім середовищем внаслідок малого часу деформування. Нагрівання заготовки в процесі деформування підвищує пластичність матеріалу і забезпечує підвищення допустимого ступеня деформації заготовки без її руйнування.

З викладеного слід зазначити, що процеси магнітно-імпульсної обробки супроводжуються створенням навколо індуктора потужного магнітного поля, силовим впливом на провідний об'єкт, розташований поблизу індуктора, і нагріванням цього об'єкта індуктованими в ньому струмами, що зажадало докладного розгляду і вирішення рівнянь електродинаміки гідродинаміки, рівнянь руху, хвильових процесів, процесів зіткнення.

Розробка та вивчення фізичних основ магнітно-імпульсної обробки дозволили створити та проаналізувати фізичні та математичні моделі процесів, покласти їх у створені розрахункові методики та комп'ютерне моделювання.

## **1.2 Обладнання, методи проведення, технологічні схеми та основні види магнітно-імпульсної обробки**

Магнітно-імпульсне обладнання використовується для магнітно-імпульсної обробки. Магнітно-імпульсне обладнання можна розглядати

як комплекс, що складається з технічного та силового обладнання, незалежно від методу та призначення.

До силового обладнання відносяться ємнісні накопичувачі С, зарядні пристрої, включаючи розширювальні пристрої (високовольтні трансформатори) ПУ і випрямляючі пристрої ВУ, комутаційні пристрої К, котушки індуктивності, пускорегулюючі пристрої ППУ, блоки запалювання БЗ, блоки автоматики, задатчики З і автоматики, вимикачі короткого замикання В, блокування та інші захисні пристрої, що складаються з елементів захисні пристрої, що складаються з елементів, вимірювальні прилади, в тому числі дільники напруги ДН.

Залежно від продуктивності, енергоспоживання, умов експлуатації та призначення МІС визначаються окремі компоненти і загальна схема обладнання та конструктивне рішення.

Перед обробкою заготовка (або інструмент) поміщається в порожнину електромагніту, наприклад, з боку північного полюса, і центр ваги заготовки виводиться з положення рівноваги. Коли пристрій увімкнено, деталь "втягується" в порожнину соленоїда магнітним полем з прискоренням під дією сили  $F_1$  і коливальним рухом всередині порожнини; під час МІО деталь (і її центр ваги) рухається в протилежному напрямку за інерцією і втягується в соленоїд з боку південного полюса.

З протилежного боку полюса електромагніту на деталь діє сила  $F_2$ , яка втягує її назад в електромагніт. Таким чином, компонент багаторазово перетинає магнітний потік і вільно рухається в порожнині соленоїда. Цей рух зменшується і врешті-решт гаситься силою тертя компонента об стінки індуктора. Коли коливання припиняються, компонент досягає положення рівноваги і сила  $F_2$  дорівнює нулю. У цьому випадку компонент знаходиться в центрі соленоїда. Частота і амплітуда коливань

залежать від напруженості магнітного поля  $W_0$ , маси компонента  $m$  і електромагнітних властивостей матеріалу.

При русі компонента в ньому генеруються вихрові струми через неоднорідну кристалічну структуру. Вихрові струми викликають магнітні поля і локалізовані мікро-вихори, які, в свою чергу, нагрівають блоки напружень і кристалічне оточення неоднорідності металевої структури. Мікроструктура сплаву покращується протягом 0,01-1,0 с.

Лабораторні експерименти на зразках зі сталей 40, У12, 3ОХГСА, 65Г, 70 та інших показали, що для поліпшення механічних і технічних властивостей достатньо генерувати імпульсні магнітні поля напруженістю менше 2000 кА/м. Однак для завершення внутрішніх процесів, пов'язаних з розсіюванням електромагнітної енергії в матеріалі деталі, потрібен час  $t$  від 5 до 24 годин.

Для інструменту зі швидкорізальних сталей, а також для деталей з конструкційних і легованих сталей тривалість одного циклу магнітної обробки не перевищує 1,0 ... 5,0 с. При цьому в магнітному полі середньої напруженості за період імпульсу 0,5 ... 1,0 с. циліндричний інструмент (або деталь) піддається «гвинтовому стисненню». Схема електродинамічних сил, що діють в порожнині індуктора на тіло деталі показана на малюнку 3. В порожнині соленоїда відбувається неодночасне намагнічування маси інструменту. Тому для завершення структурних перетворень II роду, спрямованих на зменшення в ній вільної енергії, потрібен час.

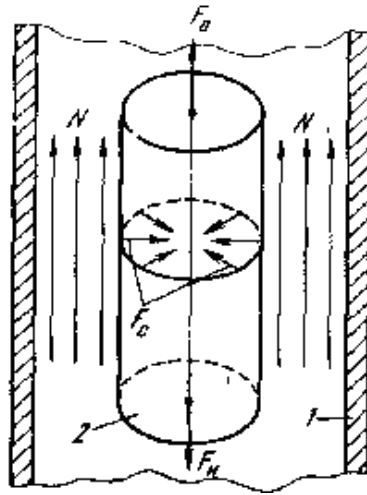


Рисунок 3 — Схема електродинамічних сил, що діють на тіло деталі в імпульсному магнітному полі:

$F_1$  — сила інерції деталі;  $F_2$  — сила впливу магнітного поля на зразок;  $F_3$  — сила, стискаюча тіло деталі;  $N$  — силові лінії магнітного поля:  
1 — соленоїд; 2 — деталь.

Теплова енергія  $W_2$  після МІО витрачається в зразках на процеси, пов'язані з фазовими перетвореннями 1-го і 2-го роду. В основному ці процеси сприяють усуненню дефектів термообробки деталей.

Сьогодні існують дві групи технологічних схем магнітно-імпульсної обробки:

- технологічні схеми безпосереднього впливу імпульсного магнітного поля на заготівлю;
- технологічні схеми впливу ІМП на заготівлі через проміжні тверді, еластичні, рідинні середовища.

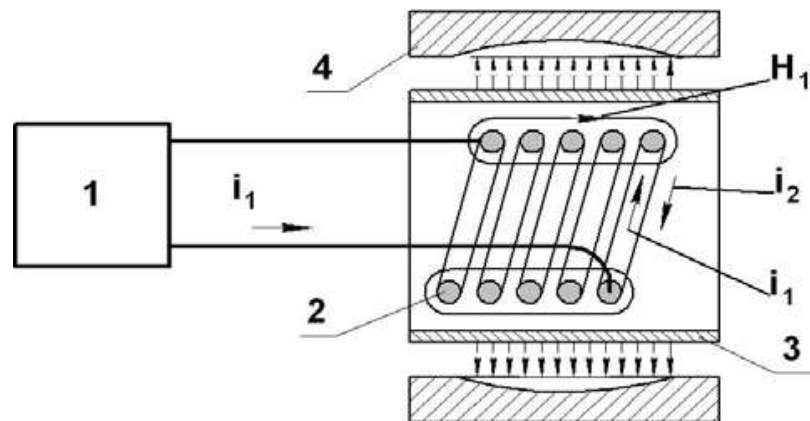
До першої групи належать технологічні схеми на «обтиск», на «роздачу» та «плоска» (Рисунок 4).

При використанні технологічної схеми «обтискання» трубчаста заготовка розміщується всередині циліндричного індуктора. Електродинамічні зусилля прагнуть стиснути заготівлю, зменшити діаметр.

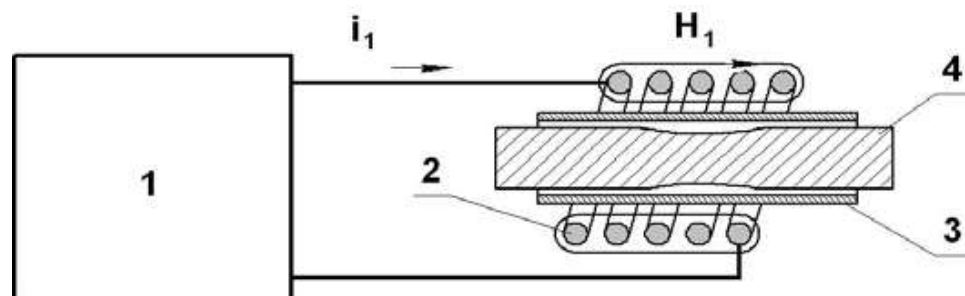
У технологічній схемі «роздача» заготівля знаходиться зовні індуктора. Тиск ІМП прагне «роздати» заготівлю, збільшити її діаметр.

У плоскій технологічній схемі використовується спіральний плоский індуктор, наприклад спіраль Архімеда, над яким розташована оброблена плоска заготовка.

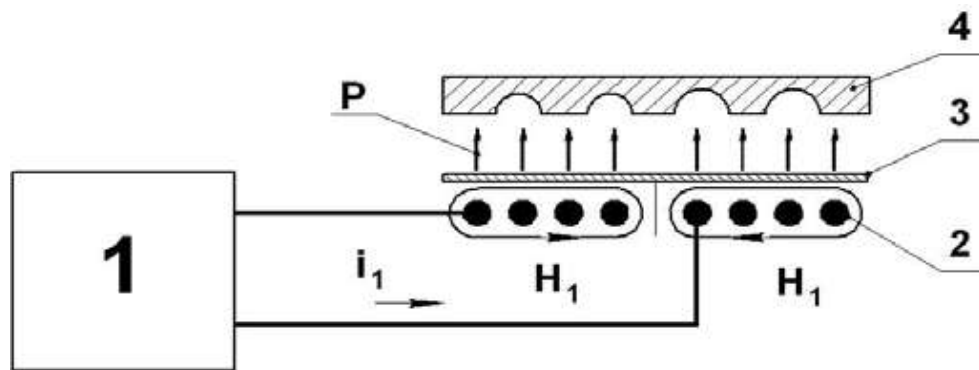
До другої групи належить технологічна схема штампування з використанням «супутника» (Рисунок 5, а), або магнітно-імпульсного приводу (Рисунок 5, б).



а



б

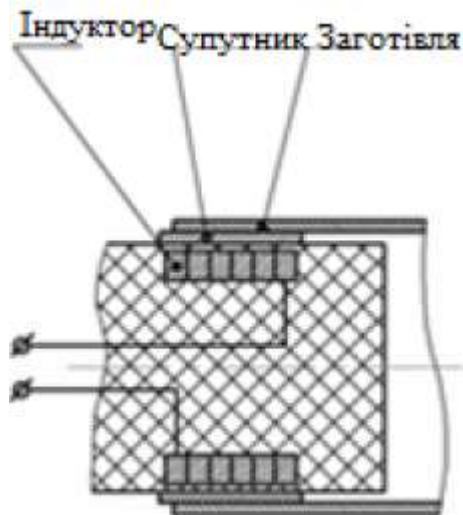


В

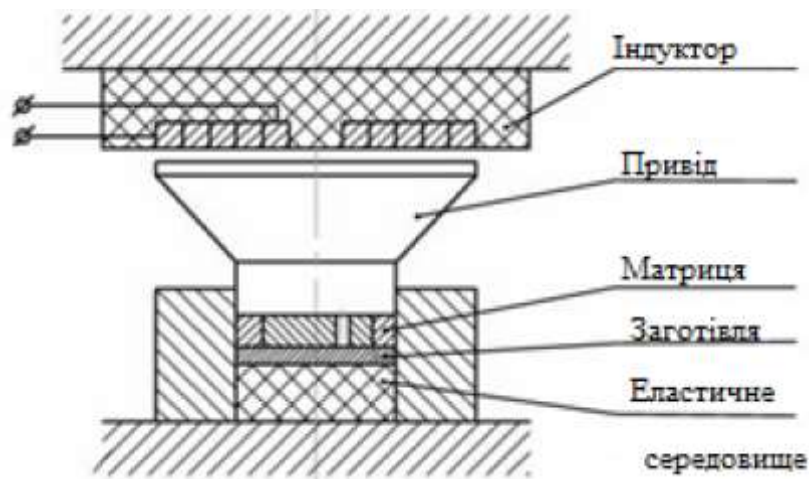
Рисунок 4 – Схеми обробки:

а – «обтиск»; б – «роздача»; в – «плоска»;

1 – МІУ; 2 – індуктор; 3 – заготівля; 4 – матриця / контрдеталь;  $i_1$  – імпульсний струм в індукторі;  $i_2$  – вихровий струм у заготівлі;  $H_1$  – напруженість імпульсного магнітного поля;  $P$  – електродинамічні сили



а



б

Рисунок 5 – Схеми магнітно-імпульсного впливу через проміжні середовища: а – «супутник»; б – привід

Як «супутник» використовується заготівля з добре електропровідного матеріалу. Наприклад, це намотана у кілька шарів алюмінієва фольга.

Застосування супутників дозволяє обробляти (передавати зусилля) заготівлі з погано електропровідних матеріалів. Після спільного деформування заготівлі та «супутника» останній видаляється.

У цих схемах (Рисунок 5, б) магнітно-імпульсне зусилля передається на привід, який далі або безпосередньо деформує метал (наприклад, електромагнітний молоток для клепки), або здійснює деформування заготовки через ще одне проміжне тіло – еластичну середу.

Крім того, можливі схеми, при яких індуктор (стрижень) і заготівля представляють єдиний електричний ланцюг, що дозволило обробляти деталі малих розмірів.

Магнітно-імпульсна обробка (МІО) включає в себе різні види обробки, які використовують магнітні поля та імпульси для зміни властивостей матеріалів. Основні види МІО включають:

1. Магнітно-імпульсна обробка вибухом (МІОВ);

Цей вид МІО використовує вибуховий пристрій для створення магнітного поля з великою імпульсною енергією. Застосовується для зміни мікроструктури та механічних властивостей матеріалів, таких як метали та сплави.

2. Магнітно-імпульсна обробка в пульсуючому магнітному полі (МІОПМП);

В цьому виді МІО використовується пульсуюче магнітне поле для обробки матеріалів. Застосовується для зміни магнітних та механічних властивостей матеріалів, а також для створення спеціальних структур.

3. Магнітно-імпульсна обробка з використанням електричного струму (МІОЕС);

В цьому виді МІО електричний струм використовується для генерації магнітних імпульсів. Застосовується для зміни структури матеріалів, підвищення міцності та міцності.

4. Магнітно-імпульсна обробка з використанням ультразвуку (МІОУЗ);

В цьому виді МІО використовується ультразвук для генерації магнітних імпульсів та покращення процесу обробки. Застосовується для зменшення зерен матеріалу, зміни текстури та інших властивостей.

5. Магнітно-імпульсна обробка за допомогою лазерного випромінювання (МІОЛВ);

В цьому виді МІО використовується лазерне випромінювання для створення імпульсів у магнітному полі. Застосовується для обробки поверхні матеріалів, поліпшення адгезії та антикорозійних властивостей.

Кожен з цих видів МІО має свої унікальні особливості та можливості, і вони використовуються в різних галузях промисловості та досліджень для покращення властивостей матеріалів і виготовлення спеціальних деталей та компонентів.

### **1.3 Переваги, недоліки та вплив на матеріал магнітно-імпульсної обробки**

Магнітно-імпульсна обробка деталей може мати різноманітний вплив на матеріали, з якими працює. Вплив МІО на матеріал зазвичай залежить від численних факторів, таких як інтенсивність і тривалість імпульсу, склад матеріалу, форма деталі, інші параметри процесу та специфікації самого матеріалу. Ось деякі загальні впливи МІО на матеріали:

1. Зміна структури матеріалу: Магнітно-імпульсна обробка може призводити до зміни мікроструктури матеріалу, включаючи зернуватість, розмір та орієнтацію зерен. Це може впливати на механічні та фізичні властивості матеріалу. Процес може сприяти рекристалізації матеріалу, що може покращити його міцність і текучість. Так, наприклад, приведемо основні зміни, які можуть відбуватися при МІО алюмінію:

- може призводити до зміни розміру зерен в структурі алюмінію. Це може виявлятися у зменшенні розміру зерен, що, в свою чергу, може покращити міцність та міцність матеріалу.

- може створювати деформаційне зміцнення алюмінію. Це означає, що матеріал може стати більш стійким до механічних навантажень та зносу.

- може впливати на текстуру алюмінію, тобто на взаємне розташування зерен у матеріалі. Ця зміна текстури може впливати на механічні та магнітні властивості.

- в окремих випадках МІО може впливати на магнітні властивості алюмінію, змінюючи його магнітну поведінку.

- може впливати на структуру міжфазних меж у матеріалі, що може мати важливий вплив на його механічні властивості та стійкість до корозії.

При цьому важливо враховувати, що ефекти МІО на алюміній можуть залежати від параметрів обробки, таких як імпульсна сила, тривалість імпульсів, температура та інші фактори. Дослідження в області МІО алюмінію ще тривають, і вони дозволяють краще розуміти ці зміни та їхні потенційні переваги для конкретних застосувань.

2. Підвищення міцності і міцності матеріалу: Магнітно-імпульсна обробка може підвищити міцність та деформаційну міцність матеріалу, зробивши його більш стійким до механічних навантажень.

3. Зміна властивостей ураженого шару: Уражений шар, який оточує оброблену область, може мати інші властивості, ніж незадіяний матеріал, і це може впливати на зносостійкість та стійкість матеріалу до корозії.

4. Поліпшення антикорозійних властивостей: МІО може збільшити антикорозійні властивості матеріалу, зменшуючи його схильність до корозії і окислення.

5. Зміна електропровідності: Магнітно-імпульсна обробка може впливати на електропровідність матеріалу, що важливо для деяких застосувань, наприклад, в електроніці.

6. Збільшення втомної міцності: МІО може покращити втомну міцність матеріалу, зменшуючи ризик тріщин і викидів під впливом циклічних навантажень.

7. Зміна твердості: Процес може вплинути на твердість матеріалу, роблячи його більш або менш м'яким, в залежності від параметрів обробки.

Важливо враховувати, що вплив МІО на матеріал може бути дуже специфічним і залежить від умов проведення процесу. Точні результати дослідження впливу МІО на конкретний матеріал можуть варіюватися, тому для конкретних деталей та матеріалів важливо провести докладні експерименти та аналіз.

Магнітно-імпульсна обробка (МІО) є потужним інструментом для модифікації матеріалів та покращення їхніх властивостей. Проте вона має як переваги, так і недоліки, які варто враховувати перед застосуванням цієї технології.

#### Переваги МІО:

1. Покращення міцності та міцності матеріалів. МІО може використовуватися для зміни структури матеріалів, що призводить до покращення їхньої міцності та міцності. Матеріали, оброблені МІО, можуть витримувати великі механічні навантаження та знос.

2. Підвищення антикорозійних властивостей. МІО може покращити стійкість матеріалів до корозії та окислення. Це особливо важливо для деталей, які експлуатуються в агресивних середовищах, таких як морська вода або хімічні розчини.

3. Зменшення тріщин та деформацій. Магнітно-імпульсна обробка може допомогти зменшити тріщини та деформації у матеріалах, зокрема під час обробки, наприклад, під час штампування або ковки.

4. Зміна електрофізичних властивостей. МІО може покращити електропровідність та магнітні властивості матеріалів, що може бути корисним в електроніці та магнітних додатках.

5. Застосування в різних галузях. Магнітно-імпульсна обробка має широкий спектр застосувань, включаючи металургію, авіацію, енергетику, медицину та інші галузі.

#### Недоліки МІО:

1. Складність технології. Магнітно-імпульсна обробка є складним процесом, який вимагає спеціалізованого обладнання та знань.

2. Великі енергетичні витрати. Генерація потужних магнітних імпульсів може вимагати значних енергетичних ресурсів.

3. Вибірковість застосування. МІО може бути ефективним не для всіх матеріалів та деталей, і вона вимагає досліджень та налаштувань для конкретного застосування.

4. Ризик надмірної обробки. Неправильне застосування МІО може призвести до надмірної зміни властивостей матеріалів, що може бути небажаним.

5. Високі витрати на обладнання. Придбання та обслуговування спеціалізованого обладнання для МІО може бути дорогим.

6. Потребує спеціалізованих знань. Використання МІО вимагає від фахівців спеціалізованих знань та навичок.

Загалом, МІО є потужною технологією з численними перевагами, але вона також має свої обмеження та вимоги. Вибір застосування МІО повинен базуватися на конкретних потребах і властивостях матеріалів, які підлягають обробці.

## **РОЗДІЛ 2. Застосування МІО в авіаційній промисловості**

### **2.1 Можливі області застосування магнітно-імпульсної обробки. МІО в авіаційній промисловості**

Магнітно-імпульсна обробка (МІО) застосовується в різних галузях промисловості та науки через її здатність впливати на фізичні та хімічні властивості матеріалів. Ось деякі з основних областей застосування МІО:

1.   Металургія:
  - покращення міцності та міцності металевих сплавів;
  - зміна структури та властивостей легированих сплавів;
  - покращення якості сталі та алюмінію для авіаційної та автомобільної промисловості.
2.   Авіація і космос:
  - зміна властивостей конструкційних матеріалів для літаків та ракет;
  - підвищення міцності та зносостійкості критичних деталей;
  - покращення термічної стійкості та міцності при екстремальних температурах.
3.   Електроніка:
  - покращення магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів для виготовлення магнітних датчиків, трансформаторів і електронних компонентів;
  - зміна структури напівпровідників та полімерних матеріалів для виробництва електроніки.
4.   Медицина:
  - зміна властивостей біоматеріалів та імплантатів для покращення сумісності з організмом;
  - покращення властивостей магнітних матеріалів для магнітної резонансної томографії (МРТ) та інших медичних обладнань.

5. Енергетика:

- покращення магнітних властивостей матеріалів для виробництва магнітних генераторів та трансформаторів;
- зміна структури матеріалів для покращення ефективності сонячних батарей.

6. Автомобільна промисловість:

- підвищення міцності та стійкості до корозії деталей автомобілів;
- покращення магнітних властивостей та міцності електромоторів та генераторів.

7. Обробка матеріалів:

- покращення якості та тривалості інструментів для обробки матеріалів (фрез, свердел і т.д.);
- зміна властивостей матеріалів для отримання спеціальних поверхневих характеристик.

Ці області застосування лише початок, і МІО продовжує досліджуватися та розвиватися в інших галузях промисловості та науки. Вона може бути важливим інструментом для покращення властивостей матеріалів та створення нових технологій і продуктів.

Що до застосування МІО у авіаційній промисловості, то сьогодні при виробництві літаків дуже важливо, щоб самі матеріали, використовувані для конструкційних елементів літаків, були міцними. Також МІО може бути застосована для зміни мікроструктури металевих сплавів, таких як титан, алюміній та нержавіюча сталь, що призводить до покращення їхньої міцності. Це дозволяє знизити вагу конструкцій та підвищити безпеку літаків.

Авіаційна промисловість має високі вимоги до міцності та міцності самих матеріалів, використовуваних для виготовлення конструкційних елементів літаків та двигунів. У цьому контексті МІО виявляється дуже ефективною

технологією. Під час МІО може відбуватися зміна мікроструктури металевих сплавів, яка включає в себе розмір зерен, орієнтацію кристалічних граней, та розподіл фаз. Ці зміни можуть покращити міцність літака та міцність матеріалів.

Процес МІО може зменшувати розмір зерен у матеріалі, що призводить до збільшення його міцності. Менше зерно означає менше слабких точок в матеріалі та більшу здатність переносити механічні навантаження без пошкодження. Ця зміна структури також може підвищити втомну міцність матеріалів, що особливо важливо для компонентів, які піддаються циклічним навантаженням.

Літаки піддаються впливу агресивних середовищ, таких як атмосферні умови та рідини, що можуть призводити до корозії та окислення металевих деталей. Магнітно-імпульсна обробка може покращити стійкість матеріалів до корозії та окислення, змінюючи їхню структуру та поверхневі властивості. Це допомагає зберегти тривалість роботи деталей літаків.

Під час МІО відбуваються зміни в структурі та поверхневих властивостях матеріалу. Це може включати в себе створення бар'єрів, які запобігають проникненню корозійних речовин у матеріал, або зміну структури, яка робить матеріал менш прийнятливим для окислення. Це допомагає також зберегти тривалість роботи деталей літаків, особливо для тих, які експлуатуються в умовах підвищеної вологості або агресивних атмосферних умов.

У сучасних літаках використовуються різноманітні електронні системи та сенсори для контролю та безпеки. МІО може бути застосована для покращення магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, використовуваних у виробництві сенсорів та електронних компонентів. Це сприяє розвитку більш точних та надійних систем управління та моніторингу в авіації.

Зміна магнітних властивостей матеріалів може бути важливою для виготовлення магнітних датчиків та трансформаторів, що використовуються в

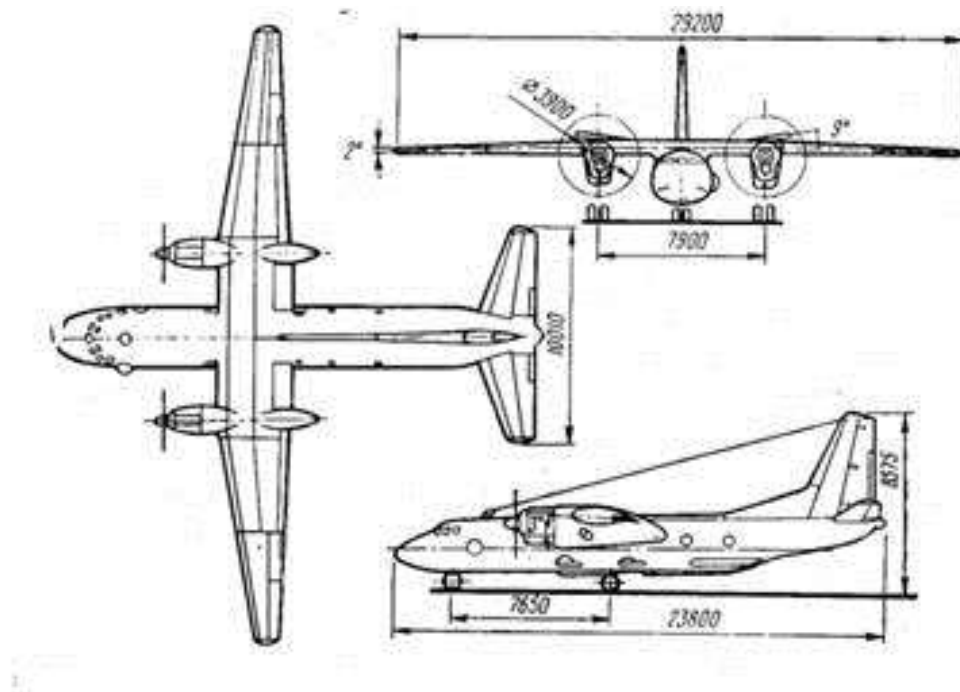
авіаційній електроніці. Також, зміна структури напівпровідників під впливом МІО може покращити їхню ефективність, що важливо для виробництва сучасних електронних компонентів.

## **2.2 Конструкторські та технологічні властивості нервюри крила літака АН-26.**

Авіаційна промисловість в Україні має багаторічну історію і є однією з ключових галузей виробництва в країні. Вона охоплює багато сфер діяльності, включаючи виробництво літаків, вертольотів, літальних апаратів без пілотів (БПЛА), двигунів, а також виробництво компонентів і систем для авіаційної і космічної техніки.

Виробництво літаків серії АН (Антонов) є важливою галуззю авіаційної промисловості в Україні. Конструкторське бюро «Антонов» є одним із найвідоміших виробників великих транспортних літаків у світі.

В цій магістерській дисертації ми розглянемо літак АН-26, та можливість використання МІО для виготовлення деталей типу нервюра крила.



## Рисунок 6 – Конструктивна схема АН 26

Загальні дані літака АН 26:

- Довжина літака 23,8м;
- Ширина літака 29,2 м;
- Висота літака 8,57 м;
- Максимальна швидкість 440 км/г;
- Нормальна злітна маса 23000 кг;
- Допустимий експлуатаційний перегруз 2,4.

Літак АН-26 (Antonov An-26) є середньо-магістральним транспортним літаком, який був розроблений і вироблений в Україні, на Київському авіаційному заводі «Антонов». Цей літак ввійшов до експлуатації в 1969 році і став однією з найпоширеніших моделей транспортних літаків у світі.

З точки зору конструкції, літак є досить складною машиною. Це пов'язано з тим, що він складається з багатьох елементів, які повинні забезпечувати міцність і надійність конструкції, гарантувати безпеку польоту, досконале управління і виконувати всі потреби і завдання, покладені на літак (Рисунок 7).

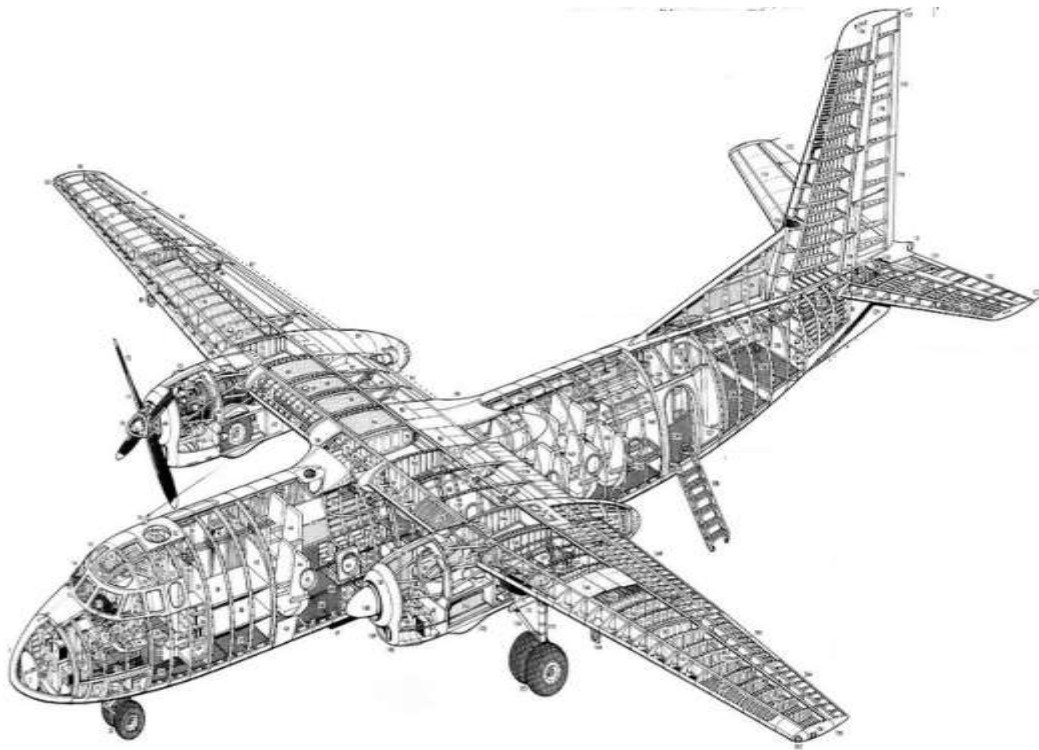


Рисунок 7 – Конструктивна схема АН 26

Нервюра – поперечний силовий виступаючий профільований елемент конструкції крила літака, що забезпечує його високу міцність та надійність.

«Нервюра» або «ребро крила» (wing rib) – це одна з ключових компонентів конструкції крила літака. Воно представляє собою горизонтальні частини або структуру, яка перетинає крило в напрямку від кореня крила (ближче до фюзеляжу) до його кінця (край крила). Ребра крила використовуються для забезпечення форми та міцності крила, а також для підтримки обшивки крила.

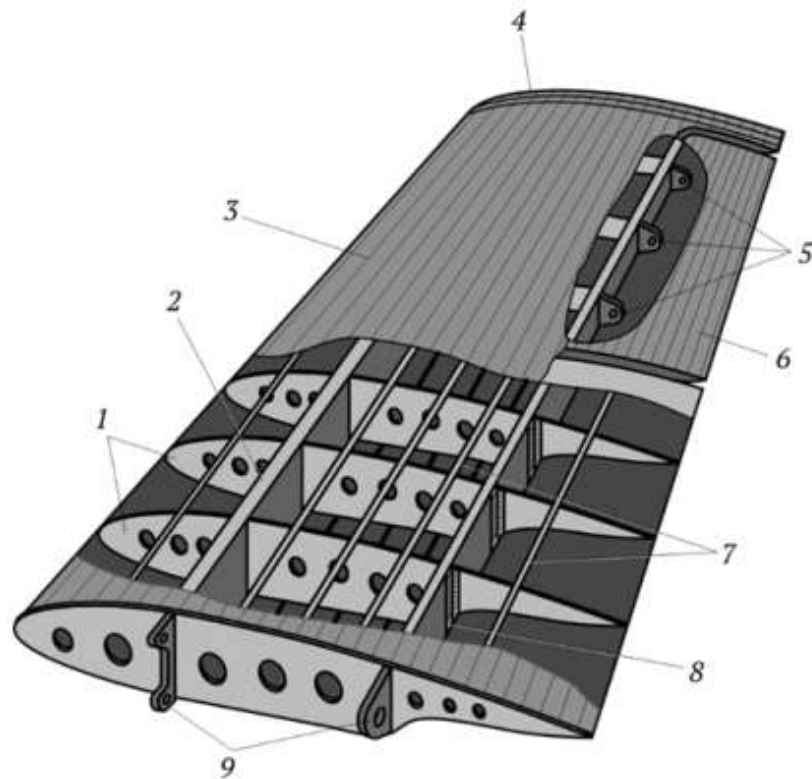


Рисунок 7 – Конструкція крила літака:

1 — нервюри; 2 — лонжерон; 3 — обшивка; 4 — кінцевий обтічник; 5 — вузли навіски елерона; 6 — елерон; 7 — стрингери; 8 — лонжерон; 9 — вузли стикування

Основні конструкторські та технологічні властивості нервюр крила включають таке:

1. Матеріал: Ребра крила, як правило, виготовляються з алюмінію або композитних матеріалів, таких як карбонові волокна або склопластик. Вибір матеріалу залежить від вимог до міцності та ваги крила.

2. Міцність: Ребра крила повинні бути досить міцними, оскільки вони несуть навантаження від обшивки крила та внутрішні навантаження, такі як тягове навантаження.

3. Форма та розмір: Форма і розмір ребер крила зазвичай визначаються аеродинамічними характеристиками крила і конструкційними вимогами. Вони можуть бути різними для різних частин крила.

4. З'єднання: Ребра крила повинні бути точно прикріплені до структури крила, включаючи вертикальні і горизонтальні стрінгери, для забезпечення їх надійності.

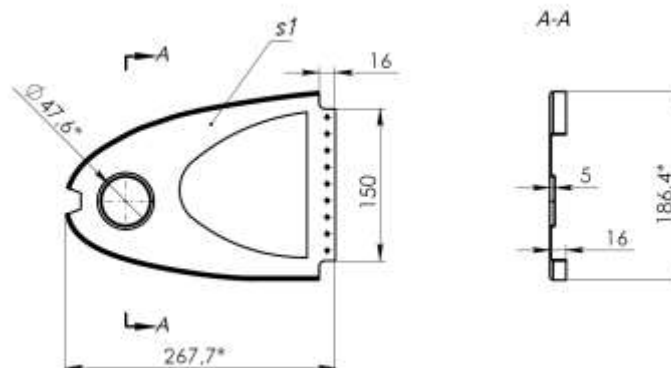
5. Маса: Маса крила має важливе значення для пального споживання та ефективності літака, тому конструктори стараються мінімізувати масу ребер крила, не зменшуючи при цьому їхню міцність.

Ребра крила - нервюри відіграють важливу роль у структурі крила літака, допомагаючи забезпечити правильну форму та оптимальні аеродинамічні характеристики. Вони є важливою частиною конструкції літака, яка сприяє його безпеці та стійкості в польоті.

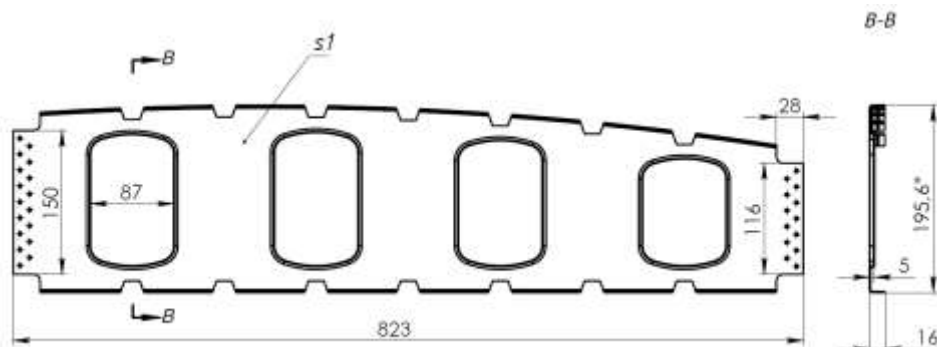
В даній роботі будемо розглядати слідуючі составні частини нервюри крила літака АН 26:

- Носова частка нервюри №12 (мал. 8);
- Середня частка нервюри №12 (мал. 9).

Матеріал виготовлення дюралюміній Д16 – алюмінієвий деформуємий сплав алюмінія з кремнієм, який застосовується для виготовлення силових елементів конструкцій.



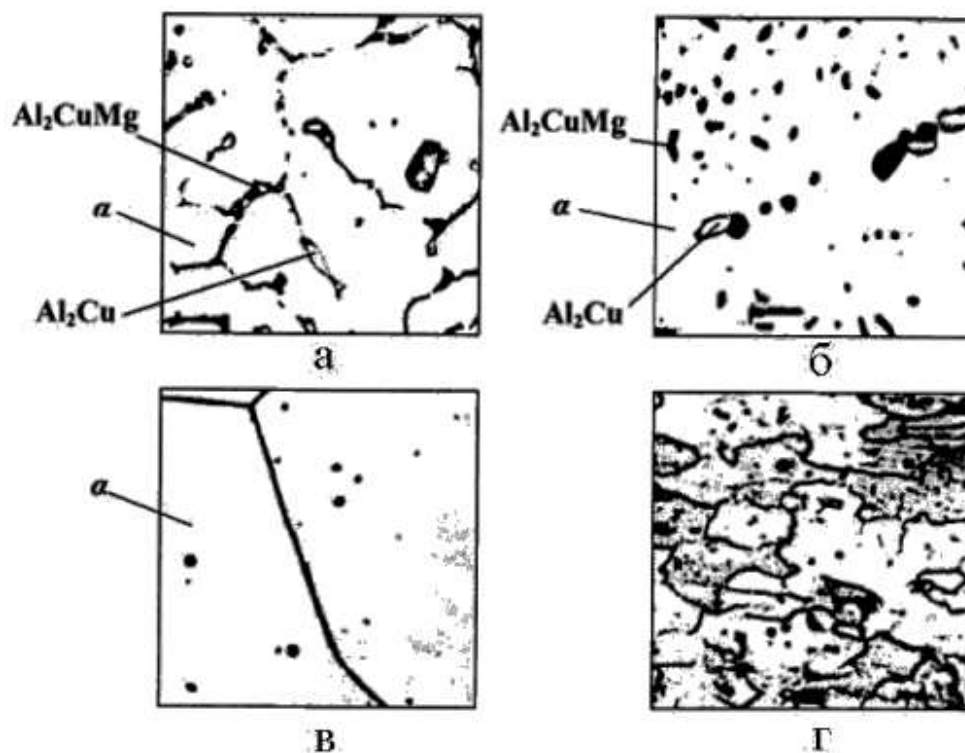
**Рисунок 8 - Носова частка нервюри №12**



**Рисунок 9** - Середня частка нервюри №12

### **2.3. Особливості матеріалу застосовуваного для виготовлення нервюри**

Матеріал виготовлення дюралюміній Д16 (3,8...4,9% Cu, 1,2...1,8% Mg, 0,3...0,9% Mn, не більше 0,5% Fe, 0,5% Si, 0,1% Ni, 0,1% Ti, 0,3% Zn, решта Al)–алюмінієвий деформуючий сплав алюмінію з кремнієм, який застосовується для виготовлення силових елементів конструкцій, дюралюміній підвищеної міцності.



**Рисунок 10** – Мікроструктура дюралюмінію Д16

а – литого, x150; б – деформованого та відпаленого, x1000;

в – загартованого,  $\times 500$ ; г – деформованого та зістареного,  $\times 200$

Мікроструктура сплаву у литому стані показана на рисунку 10а. Окрім тонких зерен твердого розчину на основі алюмінію, в цій мікроструктурі можна виявити тонкі включення  $Al_2Cu$  і темні включення  $Al_2CuMg$ , причому обидві фази розташовані на границях зерен твердого розчину. Крім них, у сплаві присутні в невеликих кількостях інші фази, але при малому збільшенні вони не виявляються.

Структура деформованого і відпаленого дюралюмінію також складається з твердого розчину з великими зернами загартованої фази і дрібними ізольованими сполуками, нерозчинними в твердому стані (рис. 10б). Після відпалу сплав характеризується низькою міцністю ( $\sigma_B = 220$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 100$  МПа), але високою пластичністю ( $\delta = 13\%$ ,  $\psi = 30\%$ ).

Після гартування ( $495\ldots 505^\circ\text{C}$  при D16.  $505^\circ\text{C}$ ) дюралюміній має структуру пересиченого  $\sigma$ -твердого розчину і фаз, що не розчинилися під час нагрівання (рис. 10в). Пересичення твердого розчину дещо підвищує міцність напівфабрикату ( $\sigma_B = 430$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 230$  МПа), але знижує його пластичність ( $\delta = 13\%$ ,  $\psi = 15\%$ ).

Природне старіння викликає перерозподіл компонентів твердого розчину, з супутнім утворенням  $1\ldots 10$  нм в діаметрі та  $0.5\ldots 1.0$  нм в діаметрі і товщиною  $0.5\ldots 1.0$  нм на поверхні кристалічного алюмінію  $\{100\}$ , утворюючи збагачену міддю зону Гіньє-Престона.

Загартування та штучне старіння ( $185\ldots 195^\circ\text{C}$  протягом  $6\ldots 13$  год) структура дюралюмінію характеризується дуже тонкою пластиною або диском (діаметром  $20\ldots 30$  нм)  $\alpha$ -твердого розчину, проміжною фазою  $\theta'$ .  $30$  нм) і частинок нерозчинної фази.

Зміцнення сплаву після природного та штучного старіння зумовлене зоною Гіньє-Престона та інтерметалідними частинками, що пригнічують дислокації.

Загартовані та природно зістарені напівфабрикати (профілі, листи тощо) з Д16 мають  $\sigma_B=440\ldots 520$  МПа,  $\sigma_{0,2}=290\ldots 380$  МПа,  $\delta=11\ldots 18\%$ ,  $\psi=15\%$

Оптична мікроскопія не виявляє фазових змін у структурі природно і штучно зістареного дюралюмінію порівняно зі структурою загартованих сплавів (рис. 10d); частинки фази  $\theta'$  можна виявити лише за допомогою електронної мікроскопії або рентгенівської дифракції. Частинки  $\theta'$  фази, розсіяні в мікроструктурі перепрацьованого дюралюмінію (температура старіння  $>200^\circ\text{C}$ ), мають розмір, який можна виявити за допомогою оптичного мікроскопа при максимальному збільшенні (1000-2000х). Надмірне старіння призводить до зниження міцності сплаву.

Отже, виділимо основні плюси (переваги) матеріалу Д16:

1. Легкість: Д16 є легким матеріалом, що робить його ідеальним для застосування в сферах, де важлива малесенька маса, таких як авіація та автомобілебудування.
2. Висока корозійна стійкість: Цей сплав має високу стійкість до корозії, що робить його популярним в морському обладнанні та будівництві.
3. Добре оброблюваний: Д16 може бути легко оброблений, включаючи фрезерування, токарний обробку і свердління.
4. Висока провідність: Висока електрична та теплова провідність робить Д16 придатним для виробництва електронних компонентів та радіаторів.
5. Відмінні механічні властивості: Він має високу міцність, стійкість до удару та витривалість, що робить його відмінним вибором для виробництва деталей, які піддаються навантаженню.

Але цей матеріал має також деякі недоліки:

1. Низька стійкість до високих температур: Д16 не є відповідним для застосувань, де вимагається висока температурна стійкість, таких як у двигунах літаків або автомобілів.

2. Низька міцність при високих температурах: При підвищених температурах міцність Д16 може зменшуватися, що робить його менш придатним для виробництва деталей, які піддаються високим навантаженням при високих температурах.

3. Вимагає обробки для підвищення міцності: Для підвищення міцності, Д16 може потребувати спеціальної обробки, такої як термообробка або обробка на станах з ЧПУ.

4. Висока вартість: Д16 може бути вищою за вартістю порівняно з іншими алюмінієвими сплавами.

5. Обмежений вибір застосувань: Цей матеріал не є універсальним і не підходить для всіх видів застосувань через його обмежені міцнісні та температурні характеристики.

Загалом можна зробити висновок, що Д16 – це корисний матеріал з багатьма перевагами, але він не є відповідним для всіх видів застосувань і вимагає ретельного розгляду в залежності від конкретних потреб і вимог проекту.

Штамповка матеріалу Д16 може мати різні дефекти або недоліки, зазвичай залежно від процесу штампування, якості сировини та умови виробництва. Д

Деякі можливі дефекти, які можуть виникнути під час штампування Д16:

1. Тріщини і розриви: Матеріал Д16 може піддаватися деформації під час штампування, що може призвести до тріщин або розривів в виробі. Це може бути результатом недостатньої температури або надмірного навантаження.

Для усунення цих дефектів слід збільшити температуру матеріалу або зменшити навантаження під час процесу штампування.

2. Недоліки на поверхні: Штамповка може призвести до дефектів на поверхні виробу, таких як подряпини, шрами або нерівності. Це може статися через неправильний контакт між штампом і матеріалом.

Для усунення цих дефектів слід забезпечити правильне налаштування штампа та врахувати дотримання вимог щодо точності виробництва.

3. Вибиття і вигини: Недоліки можуть включати вибиття або вигини в виробі, особливо у виробах зі складними геометричними формами. Це може бути наслідком недостатнього розгону чи надмірного тиску.

Для усунення цих дефектів слід правильно налаштувати параметри процесу штампування, включаючи розгін та тиск.

4. Пористість: Пористість - це дефект, коли у матеріалі утворюються пори або пустоти під час штампування. Це може вплинути на міцність і стійкість виробу.

Для усунення пористості можна використовувати вакуумні або інші технології для виділення газів з матеріалу.

5. Нерівномірна товщина стінок: У виробах з тонкими стінками може виникнути нерівномірність товщини стінок під час штампування.

Для усунення цього дефекту слід контролювати розгонку і тиск під час процесу штампування та коригувати їх відповідно до вимог.

6. Деформація: Можлива неправильна деформація виробу, яка може призвести до того, що виріб не відповідає заданій формі або розміру.

Для усунення цього дефекту слід враховувати вимоги щодо точності форми штампа і міцності виробу.

7. Відлущення поверхневого шару: В деяких випадках може статися відлущення поверхневого шару матеріалу, що може вплинути на якість покриття або стійкість до корозії.

Для усунення цього дефекту слід налаштувати процес штампування з урахуванням вимог до стійкості покриття.

Взагалі усунення дефектів під час штампування Д16 вимагає ретельного контролю процесу, правильної настройки обладнання та дотримання вимог до

якості сировини. Важливо також використовувати відповідну технологію та методи, щоб забезпечити високу якість кінцевого виробу.

Контроль дефектів під час штамповки матеріалу Д16 є важливою складовою процесу виробництва для забезпечення якості кінцевого виробу. Для контролю дефектів можуть використовуватися різні методи та техніки, наприклад:

- Візуальний контроль

Один з найбільш очевидних способів контролю - це візуальний огляд виробу після штампування. Оператори або якісні контролери оцінюють виріб на наявність видимих дефектів, таких як тріщини, подряпини, нерівності, вибиття, вигини тощо.

- Ультразвукова дефектоскопія

Цей метод включає в себе використання ультразвукових хвиль для виявлення внутрішніх дефектів, таких як тріщини, пустоти або пори у матеріалі. Вироби піддаються ультразвуковому скануванню для виявлення аномалій.

- Магнітні та радіографічні методи

Магнітні та радіографічні методи використовуються для виявлення металевих дефектів, таких як тріщини або пухлини. Вони можуть бути корисними для виробів зі складними геометричними формами.

- Дефектоскопія з використанням електромагнітних хвиль

Цей метод використовується для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів, а також для вимірювання товщини стінок виробів. Електромагнітні хвилі відправляються в матеріал і відбиваються від дефектів, що дозволяє їх виявити.

- Термічна обробка та додатковий механічний обробка

Після штампування деякі вироби можуть піддаватися термічній обробці для покращення їхніх механічних властивостей та видалення можливих

дефектів. Додаткова механічна обробка, така як фрезерування або шліфування, також може бути використана для видалення нерівностей та дефектів.

- Контроль розмірів і геометрії

Можна вимірювати розміри і геометричні параметри виробів з використанням вимірювальних приладів та інструментів, щоб переконатися, що вони відповідають специфікаціям.

- Магнітний тест на тривкість

Цей тест використовує магніти для виявлення м'яких плям або дефектів на поверхні виробу, що можуть бути не помітні візуально.

Контроль дефектів під час штамповки Д16 варіюється залежно від типу виробу, вимог до якості та процесу виробництва. Важливо проводити систематичний контроль та виявляти дефекти на ранніх стадіях виробництва, щоб забезпечити якість та безпеку кінцевих продуктів.

Основним особливостями механічної обробки Д16 складаються з декількох пунктів:

1. Д16 є легким алюмінієво-магнієвим сплавом, який добре піддається механічній обробці. Його легкість та міцність роблять його популярним матеріалом для різних інженерних та промислових рішень.

2. У порівнянні зі сталлю алюмінієві сплави мають меншу твердість, нижчий тимчасовий опір і кращу теплопровідність, що дозволяє значно підвищувати швидкість різання і подачу.

Обробка алюмінієвих сплавів характеризується такими особливостями:

- високі швидкості різання;
- низькі зусилля;
- мінімальний знос ріжучого інструменту;
- порівняно низька температура різання.

2. Іноді при обробці алюмінієвих сплавів можна зіткнутися з негативними ефектами.

Зокрема для Д16 у відожженому стані існує тенденція до формування довгої стружки, яка намотується на інструмент і забиває канавки, що призводить до поломки фрези або свердла. Тому, як правило, на інструменті для обробки сплавів алюмінію роблять великі стружкові канавки для полегшеного сходження стружки, хоча це і обмежує максимальну кількість зубів на фрезі двома або трьома.

Для обробки Д16 зазвичай використовуються твердосплавні або високошвидкісні сталі, а також різці та фрези, спеціально призначені для алюмінієвих сплавів. Ці інструменти мають бути гостро заточеними та заполірованими для ефективної обробки.

3. Після механічної обробки Д16 можуть виникнути залишкові напруги у матеріалі. Це слід враховувати при проектуванні подальшого маршруту виготовлення виробу.

4. Для алюмінієвих сплавів і зокрема Д16 необхідна витримка деталей, особливо тонкостінних, перед переустановкою, в іншому випадку може відбутися її деформірація внаслідок залишкових внутрішніх напруг, отриманих в результаті механічної обробки. Також необхідно забезпечення постійної та рівномірної подачі СОЖ або застосування системи охолодження інструменту масляним туманом для створення термоконстантних умов різання та виключення деформацій деталі.

## **2.4 Міцностний розрахунок нервюри крила літака АН 26**

Розрахунок міцнісних характеристик деталі є важливим етапом у проектуванні та виробництві будь-яких механічних конструкцій та компонентів. Основна мета цього розрахунку полягає в тому, щоб забезпечити безпеку, надійність та відповідність вимогам деталі в процесі експлуатації.

Розрахунок міцності деталей допомагає впевнитися, що вони не розірвуться або не зламаються під навантаженням. Це особливо важливо для конструкцій і компонентів, які використовуються в критичних застосуваннях, таких як авіація, автомобільна промисловість, морське суднобудування і т. д.

Також розрахунки міцності дозволяють визначити, наскільки тривалим може бути термін служби деталі до виникнення втомних пошкоджень або тріщин. Це допомагає запобігти аваріям і вибірковим відмовам.

Розрахунки міцності можуть вказати, яким чином економія на матеріалах або оптимізація конструкції може вплинути на міцність та тривалість служби деталі.

В різних галузях промисловості існують стандарти і норми, які вимагають проведення розрахунків міцності для забезпечення якості та безпеки продукції.

Розрахунки міцності можуть включати аналіз впливу різних середовищ на матеріал та конструкцію, включаючи корозію, температурні зміни та інші фактори.

Усі ці аспекти роблять розрахунки міцності необхідним елементом в конструкторському та інженерному процесі для забезпечення якості та надійності виробів та конструкцій.

Важливо відзначити, що розрахунки міцності в авіаційній промисловості повинні відповідати високим стандартам і нормативам безпеки, оскільки аварії в цій галузі можуть мати серйозні наслідки. Тому ця область вимагає великої уваги до технічної документації, експертного аналізу і випробувань на навантаження для забезпечення надійності та безпеки авіаційних конструкцій.

Нервюра крила літака АН 26 конструктивно складається з трьох частин зібраних через кріплення на лонжеронах. Для спрощення проведення міцностних розрахунків приймаємо монолітну конструкцію нервюри з сумарними розмірами згідно дійсних даних.

1. Визначаємо злітну масу літака без крила:

$$m_{зл} = m_{заг} - m_{кр},$$

де  $m_{кр} = 3900 \text{ кг}$  – маса крила літака;

$m_{заг} = 23000 \text{ кг}$  – нормальна злітна маса літака;

$$m_{зл} = 23000 - 3900 = 19100 \text{ кг}.$$

2. Визначається сила впливу крила на фюзеляж (з урахуванням коефіцієнта безпеки) при максимальному експлуатаційному навантаженні:

$$P_e = 1,5 * n_{ymax} * g * m_{зл},$$

де  $n_{ymax} = 2,4$  - максимальне експлуатаційне навантаження;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  - прискорення вільного падіння;

$$P_e = 1,5 * 1,8 * 9,8 * 19100 = 673848 \text{ Н} \approx 673,8 \text{ кН}$$

3. Визначаємо силу, що діє на обрану ділянку крила за формулою:

$$P_{діл} = (P_e / S_3) * S_{діл},$$

де  $S_3 = 18,74 \text{ м}^2$  – загальна площа крила в плані;

$S_{діл} = 0,9 \text{ м}^2$  – площа обраної ділянки крила зони розглядаємої нервюри.

$$P_{діл} = (673848 / 18,74) * 0,9 = 32362 \text{ Н}$$

4. Розподіл цього навантаження по довжині нервюри визначається нормами міцності або експериментально. Найбільш поширений квадратичний закон зміни аеродинамічного навантаження вздовж нервюри. На основі цього закону розрахуємо аеродинамічну силу у різних перерізах:

$$P_{пер i} = k * x_i^2,$$

де  $k$  - коефіцієнт пропорційності,

$x_i$  – відстань від хвостовика нервюри до  $i$ -го перерізу.

Коефіцієнт пропорційності розраховуємо по наступній формулі:

$$k = 3 * P_n / b_{діл}^3,$$

де  $b_{dil} = 1,72 \text{ м}$  – довжина нервюри,

$P_n = P_{dil} = 32,36 \text{ кН}$  – номінальна сила.

$$k = 3 * 32,36 / 1,72^3 = 6,34$$

Результати розрахунків зведемо в таблицю.

Таблиця 1

Аеродинамична сила у перерізах

| № перерізу | $x_i, \text{ м}$ | $P_{\text{пер } i}, \text{ кН}$ |
|------------|------------------|---------------------------------|
| 1          | 0                | 0                               |
| 2          | 0,346            | 0,76                            |
| 3          | 0,688            | 3                               |
| 4          | 1,034            | 6,78                            |
| 5          | 1,47             | 13,7                            |
| 6          | 1,722            | 18,79                           |



Рисунок 12 - Погонні навантаження розрахункової нервюри

5. Згідно схеми розрахунку нервюра розглядається як статично визначена балка змінної висоти з опорою у двох місцях на лонжерони а також на обшивку.

Оскільки реакції розподіляються пропорційно згинальним жорсткостям перерізів, які, у свою чергу, пропорційні квадрату висот, можемо записати:

$$R_1/R_2 = h_1^2/h_2^2,$$

де  $R_1$ ,  $R_2$  – реакції опор;

$h_1 = 178.6 \text{ мм}$ ,  $h_2 = 152.8 \text{ мм}$  – висоти перерізів.

Звідси:

$$R_1 = R_2 * h_1^2 / h_2^2$$

Складемо рівняння реакцій:

$$R_1 + R_2 = P_H,$$

Отже:

$$R_2 + R_2 * h_1^2 / h_2^2 = P_H$$

Звідси:

$$R_2 = P_H / (1 + h_1^2 / h_2^2)$$

$$R_1 = P_H - R_2$$

$$R_2 = 32362 / (1 + 178.6^2 / 152.8^2) = 13677 \text{ Н}$$

$$R_1 = 32362 - 10258 = 18658 \text{ Н}$$

Побудуємо епюри сил та моментів:

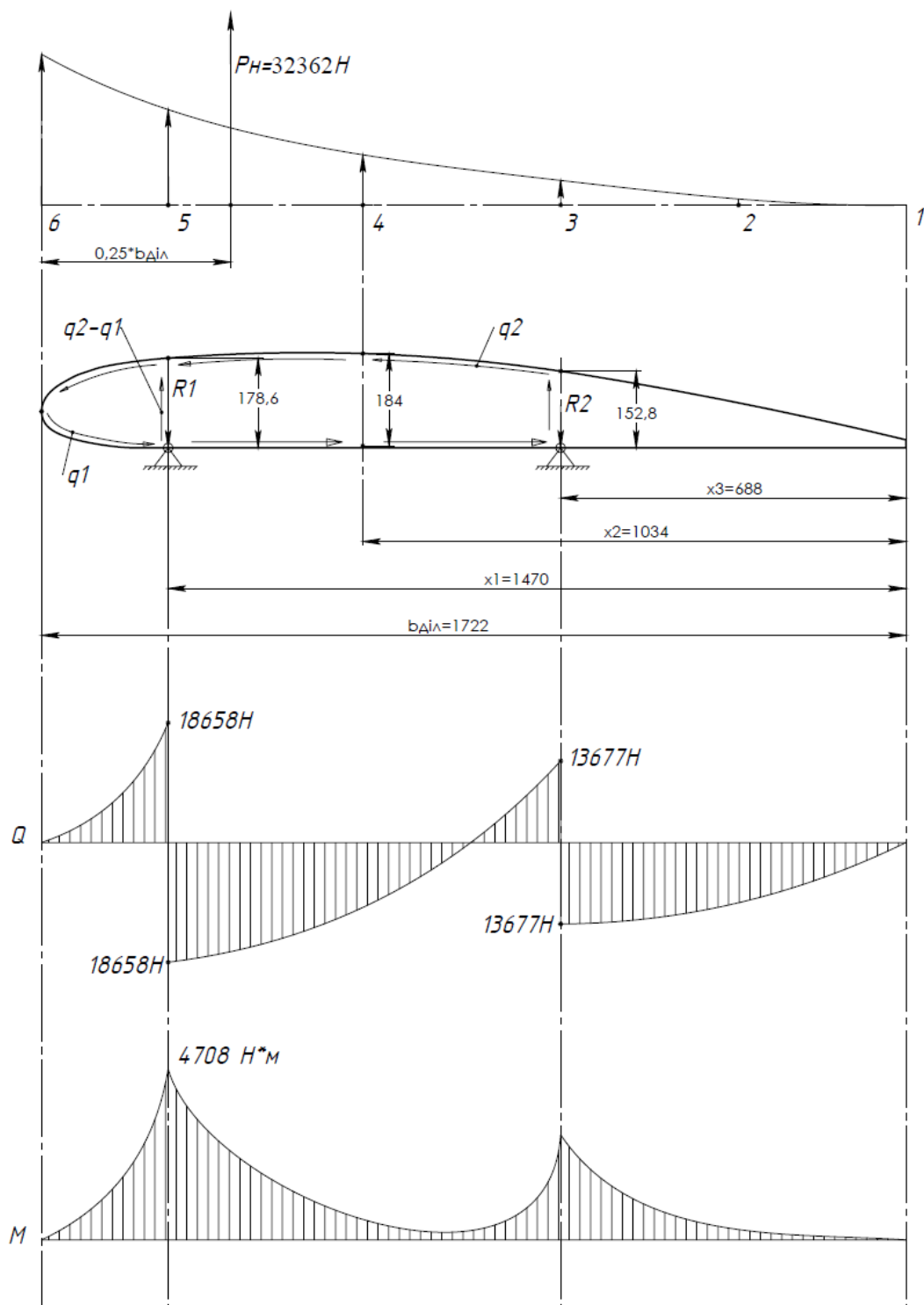


Рисунок 13 – Розрахункова схема, епюри сил і моментів

6. Якщо аеродинамічна сила  $P_{\text{діл}}$  не прикладена до центру інерції, то виникає момент  $M_n$ , що прагне повернути нервюру. Цей момент урівноважується погонним дотичними силами в обшивці та стінках лонжеронів. Момент  $M_n$  для крила є скручувальним, а для нервюри згинальним.

Оскільки  $R_1$  і  $R_2$  пропорційні згинальним жорсткостям лонжеронів знаходити центр інерції не потрібно, тому що момент відносно довільній точки буде відповідати моменту відносно центру інерції.

$$M_n = R_2 \cdot (x_1 - x_2) - P_n \cdot (0,75 \cdot b_{\text{діл}} - x_1)$$

$$M_{n1} = 13677 \cdot (1,470 - 0,688) - 32362 \cdot (0,75 \cdot 1,72 - 1,470) = 4919 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Знайдемо реактивні потоки у кожному контурі, використовуючи формулу Бредта:

$$q_i = M_{ni} / \Omega_i,$$

де  $\Omega_i$  - подвоєна площа охоплювана контуром перерізу

$$\Omega_1 = 0,14 \text{ м}^2$$

$$\Omega_2 = 0,3 \text{ м}^2$$

$$\Sigma \Omega_i = 0,48 \text{ м}^2$$

$$M_{ni} = M_n \cdot \Omega_i^2 / \Sigma \Omega_i^2$$

$$M_{n1} = 4919 \cdot 0,14^2 / 0,48^2 = 418 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{n2} = 4919 \cdot 0,3^2 / 0,48^2 = 1921 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$q_1 = 418 / 0,14 = 2989 \text{ Н/м}$$

$$q_2 = 1921 / 0,3 = 6404 \text{ Н/м}$$

Сила та момент у довільному перерізі міжлонжеронної ділянки:

$$Q_i = -1/3 * P_{\text{нер} i} * x_i + R_2 - q_2 * h_x = -1/3 * k * x_i^3 + R_2 - q_2 * h_x$$

$$M_i = (1/3 * P_{\text{нер} i} * x_i) * 1/4 * x_i - R_2 * (x_i - x_3) + q_2 * \Omega_x$$

Виходячи з умов роботи нервюри на зсув, визначаємо межу міцності на зріз:

$$\tau_i = Q_i / (0.9 * h_i * \delta) \leq \tau^p,$$

Також визначимо міцність нервюри на вигин по полицях у поперечному напрямку:

$$\sigma_i = M_i / (x_i * \delta * b_n),$$

де  $\delta = 1$  мм – товщина вертикальної стінки нервюри;

$b_n = 18$  мм - ширина полиці;

$\tau^p = (0,25 \dots 0,33)$  σв - розрахункова напруга в обшивці при зсуві;

де σв=450МПа – межа міцності матеріалу нервюри (Д16)

$$\tau^p = 0,28 * 450 = 126 \text{ МПа} = 126000000 \text{ Н/м}^2$$

Зробимо розрахунки для двох місць розташованих на відстані  $x_1$  та  $x_2$  відповідно (див. Рисунок). Результати розрахунків зведемо в таблицю.

Таблиця 2

Розрахунок межі міцності нервюри по перерізах

| № місця | $x_i$ , м | $P_{\text{пер} i}$ , Н | $Q_i$ , Н | $M_i$ , Н*м | $\tau_i$ , МПа | $\sigma_i$ , МПа |
|---------|-----------|------------------------|-----------|-------------|----------------|------------------|
| 1       | 1,47      | 13700                  | 5822      | 9796        | 36             | 150              |
| 2       | 1,034     | 6780                   | 10163     | 2805        | 61             | 370              |

Виходячи з проведених розрахунків бачимо що нервюра має майже подвійний запас міцності, що дає можливість розглянути варіант виготовлення з більш тонкого листа застосовуючи технологію магнітно-імпульсного формування.

Аналізуючи результати проведених експериментів на металевих зразках які проводились фізико-технічним інститутом Національної академії наук Білорусі та Барановичським університетом можна зробити висновок що поверхнева міцність виробів після МІО збільшується на 16-20% [1].

Опираючись на вище вказані дані межа міцності матеріалу нервюри (Д16) після МІО буде становить  $\sigma_v = 450 * 1,18 = 531 \text{ МПа}$ .

Зробимо розрахунок товщини ребра  $\delta_i$  по перерізах та ширини полиць  $B_i$  при виготовленні нервюри за допомогою МІО та зведемо дані у таблицю.

$$\delta_i = Q_i / (0.9 * h_i * \tau^p),$$

$$\text{де } \tau^p = 0,28 * 531 = 148 \text{ МПа} = 148000000 \text{ Н/м}^2$$

$$B_i = M_i / (x_i * \delta * \sigma_v),$$

Таблиця 3

Розрахунок товщини листа для нервюри виготовленої за допомогою МІО по перерізах

| № місця | $x_i$ , м | $P_{\text{пер } i}$ , Н | $Q_i$ , Н | $M_i$ , Н*м | $\delta_i$ , мм | $B_i$ , мм |
|---------|-----------|-------------------------|-----------|-------------|-----------------|------------|
| 1       | 1,47      | 13700                   | 5822      | 9796        | 0,24            | 16         |
| 2       | 1,034     | 6780                    | 10163     | 2805        | 0,41            | 7          |

Виходячи з даних розрахунку можна зробити висновок, що використовуючи технологію МІО при виготовленні нервюр можна зменшити їх товщину до 0,8 мм, при цьому маючи майже двократний запас по міцності.

Для перевірки даної гіпотези зробимо комп'ютерне моделювання навантаження на нервюру виготовлену з використанням технології МІО за допомогою програмного комплексу SolidWorks Simulations.

В програмному комплексі SolidWorks Simulations були виконані наступні дії:

- розставлені фіксуючі залежності;
- створення кінцево-елементної сітки моделі виробу;
- проставлені сили діючі на нервюру.

Отримані результати розрахунку представлені на малюнку 14.

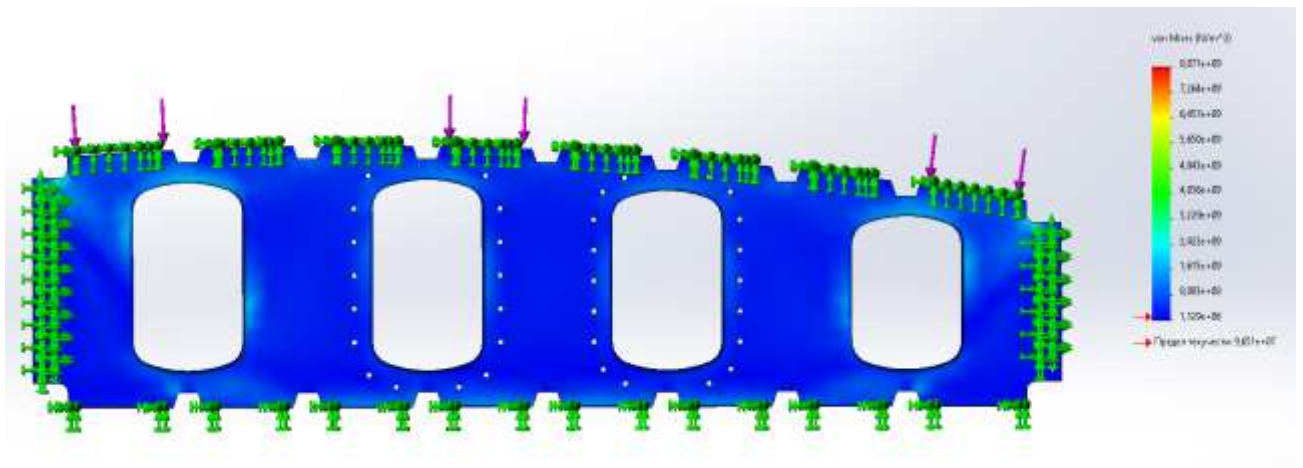


Рисунок 14 - Комп'ютерне моделювання навантаження на нервюру виготовлену з використанням технології МІО

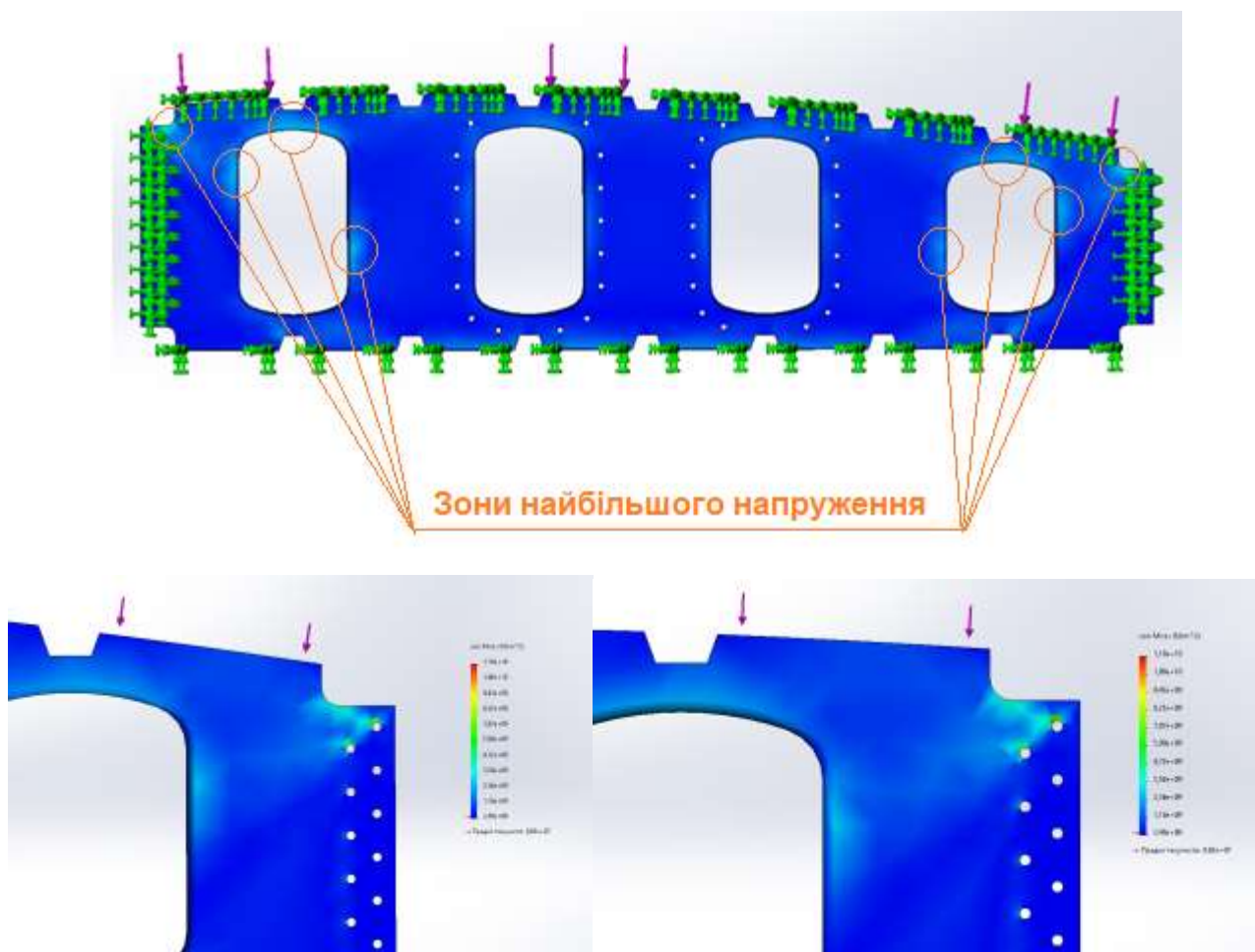


Рисунок 15 – Зони найбільшого напруження нервюри

З приведених малюнків можна зробити висновок, що більш напруженими є ділянки нервюри навколо крайніх отворів, а також у містах радіусного переходу до міст кріплення нервюри до лонжеронів (див рисунок 15).

Однак в цілому критичних вузлів даний виріб не має, що підтверджує міцностний розрахунок та висновок про можливість зменшення товщини листа для виготовлення даної нервюри, а також для інших несилкових нервюр крила літака.

## **2.5 Визначення оптимальних параметрів для МІО та розробка рекомендацій щодо застосування даної технології на виробництві**

Технологічні процеси магнітно-імпульсної обробки носять складний електромеханічний характер. Навантаження заготовки здійснюється електродинамічними силами, що виникають унаслідок взаємодії змінного магнітного поля, створюваного індуктором під час розряду енергії, накопиченої в конденсаторній батареї магнітно-імпульсної установки (МІУ), зі струмом, наведеним цим полем у заготовці. Імпульс струму протікає в приповерхневих шарах індуктора і заготовки, звернених один до одного, і викликає їх нагрівання, що призводить до зміни їхніх фізичних властивостей і параметрів розрядного ланцюга.

Оскільки тривалість процесу МІО визначається часом наростання струму в індукторі, поверхня заготовки піддається ударному навантаженню.

До процесів, що призводять до зміцнення поверхні сталевих виробів під впливом магнітного імпульсу, крім деформацій, що призводять до ущільнення структури поблизу поверхні, відносяться також явища фазових перетворень аустеніт-мартенсит, міграції домішок і дефектів поблизу меж зерен, виникнення дрібнодисперсної структури на поверхні утворенням нових кордонів між зернами та дробленням пластинок цементиту.

Таким чином, на результат процесу діє безліч взаємно пов'язаних факторів. Тому аналітичні розрахунки та чисельне моделювання процесів магнітно-імпульсної обробки металів (МІО) зазвичай проводять на спрощених моделях за припущень, що стосуються параметрів розрядного ланцюга МІУ і магнітного поля в ізоляційному зазорі, в матеріалі індуктора і заготовки, а також фізичних і механічних властивостей матеріалів індуктора і заготовки.

При магнітно-імпульсній обробці плоскої поверхні виробу використовується спеціальний індуктор. Струмopовідний виріб міститься зверху індуктора і в ньому виникає індукційний струм, пропорційний швидкості

зміни магнітного потоку через площу його перерізу, при збудженні імпульсу електричного струму в індукторі.

Для зміцнення поверхневого шару виробу необхідно, щоб тиск  $P_e$ , що створюється електромагнітним полем, перевищував межу плинності матеріалу  $\sigma_t$ , тобто повинна виконуватися нерівність:

$$P_e \geq \sigma_t$$

Тиск, що створюється при магнітно-імпульсному зміцненні, може бути розрахований з використанням наступної формули:

$$P = (\mu_0 * I^2 * N^2 * s) / (2 * \pi * r * t),$$

де  $P$  - тиск, Па;

$\mu_0$  - магнітна постійна, приблизно рівна  $4\pi \times 10^{-7}$  Тл·м/А;

$I$  - сила струму через індуктор, А;

$N$  - кількість витків дроту в індукторі;

$s$  - площа перерізу деталі, що піддається магнітно-імпульсної зміцнювальній обробки, м<sup>2</sup>;

$r = 0.0005$  - відстань між деталлю та котушкою, м;

$t = 0.0001$  - тривалість магнітного імпульсу, с.

Виходячи з комп'ютерного моделювання навантажень на аналізований виріб визначаємо площу та форму зон, які необхідно піддати МІО (див. рисунок 16).

Індуктор №1 використовуватиметься для зони ф42, площа якої дорівнює:

$$S_I = 2 * \pi * R^2 = 2 * 3.14 * 21^2 = 2769 \text{ мм}^2 = 0,0027 \text{ м}^2$$

Індуктор №2 використовуватиметься для зони 30\*45, площа якої дорівнює:

$$S_2 = b * l = 30 * 45 = 1350 \text{ мм}^2 = 0,00135 \text{ м}^2$$

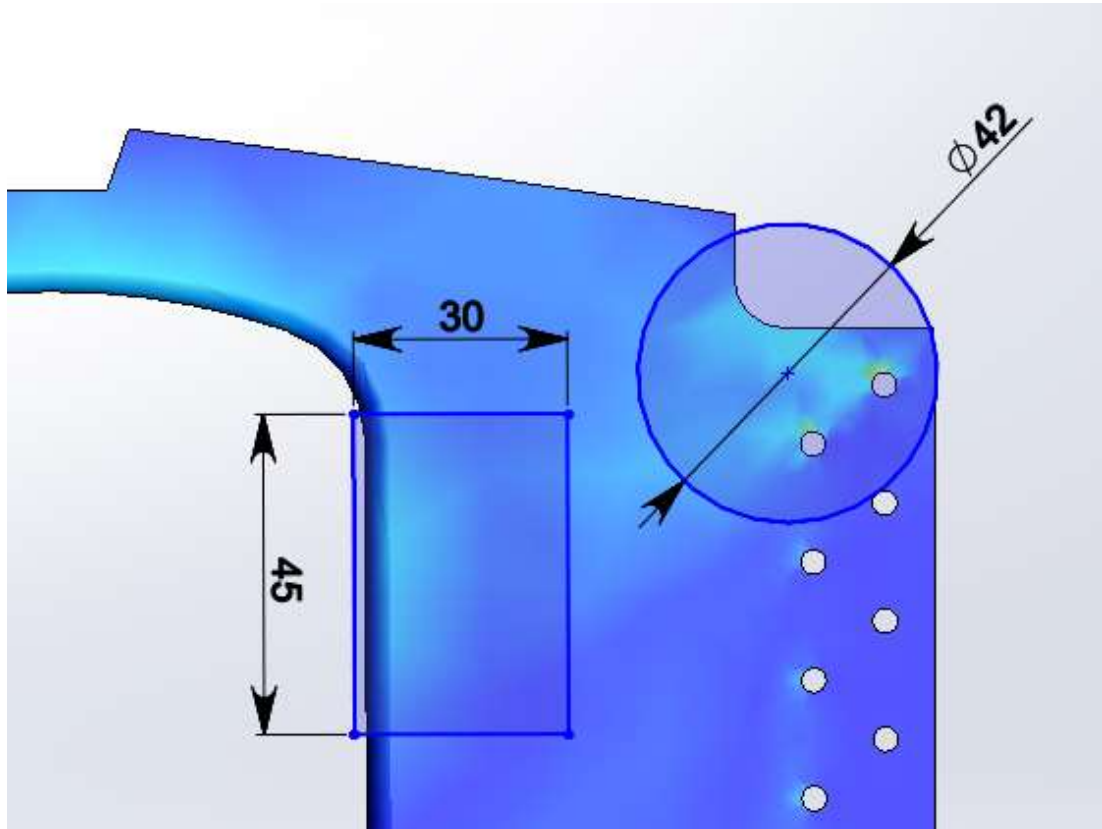


Рисунок 16 – Конфігурація зон дії індукторів

Для проектування конфігурації витків індуктора розраховуємо необхідну площу перерізу дроту індуктора:

$$A = (I_{max} * \rho * L) / (T_{max}),$$

де  $I = 70 \text{ кА}$  - сила струму, який проходить через індуктор;

$\rho = 1.68 * 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – питомий опір матеріалу дроту;

$L = 0.5 \text{ м}$  – довжина дроту в індукторі;

$T_{\max} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$  – максимально допустима температура для ізоляції шини класу Н

Для індуктору №1:

$$A_1 = 70000 * 1.68 * 10^{-8} * 0.5/180 = 3.27 * 10^{-7} \text{ м}^2 = 3.27 \text{ мм}^2$$

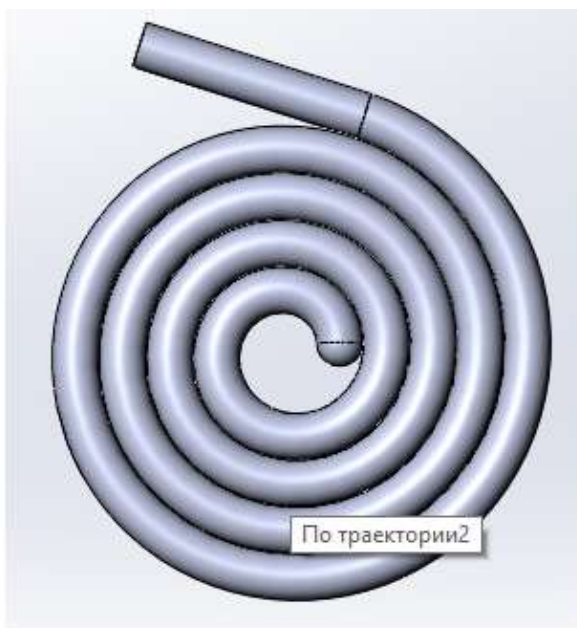
Що відповідає діаметру шини індуктора №1  $d \approx 4 \text{ мм}$

Для індуктору №2:

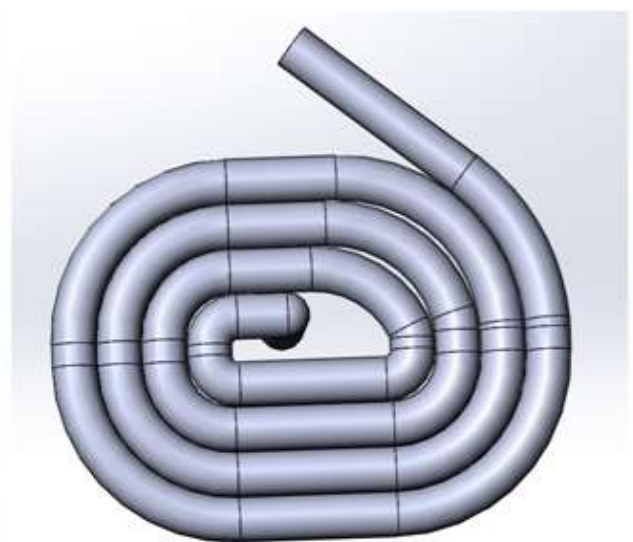
$$A_2 = 70000 * 1.68 * 10^{-8} * 0.5/180 = 9.3 * 10^{-7} \text{ м}^2 = 3.27 \text{ мм}^2$$

Що відповідає шині діаметром  $d = 4 \text{ мм}$  для індуктора №2.

Побудовані за даними витки індукторів представлені малюнку 17.



а)



б)

Рисунок 17 – Сформовані шини індукторів: а – індуктор №1,  
б – індуктор №2.

З побудови спіралей шин отримуємо кількість витків для індуктора №1  $N = 4$  для індуктора №2  $N = 4$ .

Розраховуємо тиск, що створюється електромагнітними полями індукторів.

$$P_I = (4 * 3,14 * 10^{-7} * 70000^2 * 4^2 * 0,0027) / (2 * 3,14 * 0,0005 * 0,0001) = 868 \text{ МПа}$$

$$P_I = (4 * 3,14 * 10^{-7} * 70000^2 * 4^2 * 0,00135) / (2 * 3,14 * 0,0005 * 0,0001) = 423 \text{ МПа}$$

З вказаної вище умови:

$$P \geq \sigma_m,$$

де  $\sigma_T = 300 \text{ МПа}$  – межа плинності матеріалу деталі (Д16)

Отже зміцнювальний ефект може бути досягнутий.

Розрахуємо силу струму необхідну для виконання зміцнення за формулою:

$$I = \sqrt{(2 * \pi * r * t * \sigma_T) / (\mu_0 * N^2 * s)}$$

Для індуктору №1:

$$I_I = \sqrt{(2 * 3,14 * 0,0005 * 0,0001 * 300 * 10^6) / (4 * 3,14 * 10^{-7} * 4^2 * 0,0027)} = 41 \text{ кА}$$

Для індуктору №2:

$$I_2 = \sqrt{(2 * 3.14 * 0.0005 * 0.0001 * 300 * 10^6) / (4 * 3.14 * 10^{-7} * 4^2 * 0.00135)} = 60 \text{ кА}$$

Розрахуємо енергію розряду за формулою:

$$E = 0.5 * L * I^2$$

де:

E - енергія розряду, Дж;

L - індуктивність індуктора, Гн;

I - сила струму в індукторі, А

Для катушок у вигляді спіралі Архімеда індуктивність L визначається за такою формулою:

$$L = \frac{\mu * N^2 * S}{2d},$$

де  $\mu = 0,000001256$  - магнітна проникність матеріалу в індукторі, Гн/м;

N = 4 - кількість витків дроту в індукторі;

A - площа перерізу індуктора, м<sup>2</sup>;

D = 0,002 - відстань між сусідніми витками індуктора, м.

Для індуктору №1:

$$L = \frac{0,000001256 * 4^2 * 0.0027}{2 * 0.002} = 1.39 * 10^{-5} \text{ Гн}$$

Для індуктору №2:

$$L = \frac{0,000001256 \cdot 4^2 \cdot 0.00135}{2 \cdot 0.002} = 6.78 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

Енергія розряду для індуктору №1:

$$E = 0.5 \cdot 1.39 \cdot 10^{-5} \cdot 41000^2 = 11.68 \text{ кДж}$$

Енергія розряду для індуктору №2:

$$E = 0.5 \cdot 6.78 \cdot 10^{-6} \cdot 60000^2 = 12.2 \text{ кДж}$$

По потрібній енергії розряду можемо підібрати готове рішення на ринку або спроектувати своє обладнання з урахування необхідної інтенсивності роботи виробництва.

Перед запуском даної технології зміцнення у виробництво рекомендовано зробити наступні кроки:

1 Вибрати рекомендовані початкові параметри МІО для ваших матеріалів та деталей, наприклад: інтенсивність магнітного поля, кількість імпульсів та тривалість обробки. Ці параметри можуть змінюватись в залежності від матеріалу та конкретних вимог.

2 Перед впровадженням МІО на виробництві провести тестування на зразках, щоб переконатися в ефективності та безпеці процесу.

3 Переконатися, що деталі або матеріали, які потрібно зміцнити, знаходяться у відповідному стані та не мають суттєвих дефектів.

4 Контролювати параметри МІО у процесі, щоб переконатися, що вони відповідають встановленим специфікаціям.

5 Після завершення процесу МІО провести вимірювання та випробування для оцінки досягнутих результатів. Це допоможе переконатися у ефективності зміцнення.

### **РОЗДІЛ 3. Економічна ефективність застосування МІО в авіаційної промисловості**

#### **3.1 Аналіз нового варіанту технології виробництва**

Зробимо порівняння базового та нового варіанту технології виготовлення нервюри №12 літака АН-26.

Таблиця 4

Порівняння базового варіанту маршрутної технології з маршрутом з використанням МІО

| Базова технологія |                | Технологія з МІО |                    |
|-------------------|----------------|------------------|--------------------|
| 005               | Контрольна     | 005              | Контрольна         |
| 010               | Плазморізальна | 010              | Плазморізальна     |
| 015               | Слюсарна       | 015              | Слюсарна           |
| 020               | Фрезерувальна  | 020              | Фрезерувальна      |
| 025               | Термообробка   | 025              | Термообробка       |
| 030               | Штампувальна   | 030              | Штампувальна       |
| 035               | Термообробка   | 035              | Термообробка       |
| 040               | Контрольна     | 040              | Магнітно-імпульсна |
|                   |                | 045              | Контрольна         |

Отже бачимо що в порівнянні до базового технологічного процесу з'являється нова операція – 040 Магнітно-імпульсна.

Головною ідеєю її впровадження є підвищення міцності та витривалості деталей крила літака. Тому збільшення виробничого циклу виготовлення нервюри є технологічно обґрунтованим.

Трудомісткість даної операції складеться на 90% з установки та закріплення деталі перед магнітно-імпульсною обробкою, та розкріплення і зняття після обробки. Тому трудомісткість приймаємо по нормативам підприємства для фрезерувального верстата с закріпленням нежорсткої заготовки болтами й планками –  $T_{шт.к.} = 8,5 \text{ мин} = 0,14 \text{ год.}$

### **3.2 Техніко-економічне обґрунтування застосуванню МІО**

Вхідними даними для виконання техніко-економічного обґрунтування стосовно використання магнітно-імпульсної обробки при виготовленні виробів типу нервюра літака є:

- річна програма випуску аналогічних з розглянутою нервюрою №12 деталей літаків  $n = 10000$  шт;
- орієнтовна вартість установки МІО  $V_{поч} = 400000$  грн;
- встановлена потужність установки  $N = 7\text{кВт}$ ;
- орієнтовний термін служби установки МІО  $T_c = 5$  років;
- вартість  $1\text{кВт}\cdot\text{год}$  електроенергії для підприємства – 5,5 грн;

Визначимо прямі та опосередковані витрати, пов'язані з впровадженням та експлуатацією МІО.

До прямих витрат при використанні технології МІО будуть належать наступні:

- амортизаційні відрахування за нове обладнання;
- додаткова електроенергія для забезпечення технології;
- витрати на оплату праці робітників, які безпосередньо будуть виконувати цю операцію у виробництві.

Оскільки розрахунок буде вестися тільки у розрізі однієї технологічної операції опосередковані витрати (адміністративні, загальні операційні, тощо) урахувати не будемо.

Розрахуємо амортизаційні відрахування за прямолінійним методом:

$$A = (B_{\text{поч}} - B_{\text{ост}}) / T_c,$$

- де  $B_{\text{ост}} = 100000$  грн - остаточна вартість установки МІО;

$$A = (400000 - 100000) / 5 = 60000 \text{ грн/рік}$$

Визначимо завантаження обладнання:

$$K_z = T_{\text{шт.к.}} * n / F_{\text{до}},$$

де  $F_{\text{до}}$  – дійсний фонд часу роботи обладнання

$$F_{\text{до}} = ((D_k - D_v - D_n) \cdot F_{\text{см}} - D_{\text{пред}} \cdot T_{\text{сокр}}) K_{\text{см}} \cdot K,$$

де  $D_k$  – кількість календарних днів цього року;

$D_v$  – кількість вихідних днів цього року;

$D_n$  – кількість святкових днів цього року;

$F_{\text{см}}$  – тривалість зміни (8 год);

$D_{\text{пред}}$  - кількість передсвяткових днів;

$T_{\text{сокр}}$  - час, на який скорочується передсвятковий день (1);

$K_{\text{см}}$  - кількість змін на добу (1; 2; 3);

$K_r$  - коефіцієнт, що враховує втрати часу на ремонт (0,95).

$$F_{\text{до}} = ((365 - 118) * 8 - 3 * 7) * 1 * 0,95 = 1857 \text{ год}$$

Розрахуємо коефіцієнт загрузки обладнання:

$$K_3 = 0,14 \cdot 10000 / 1857 = 0,75$$

Розрахуємо споживання електроенергії установкою за рік роботи:

Оскільки цикл роботи установки МІО складається з циклів зарядки конденсаторної батареї та її розрядки на індуктор під час роботи, то найбільш значне споживання електроенергії буде під час циклу зарядки.

Час зарядки відбувається впродовж 20% від загального часу роботи установки. Під час зарядки установка споживає 7кВт. Відповідно за рік:

$$F_{до} \cdot 0,2 \cdot N = 1857 \cdot 0,2 \cdot 7 = 2600 \text{ кВт} \cdot \text{г}$$

Що в грошовому еквіваленті становить:

$$E_y = 2600 \cdot 5,5 = 14300 \text{ грн.}$$

Розрахуємо фонд заробітної плати оператора установки МІО:

Чисельність операторів розрахуємо за формулою:

$$R_o = \frac{n \cdot t_{um}}{F_{dp} \cdot K_{вн}},$$

де  $F_{др}$  - дійсний фонд часу роботи робітника, год

$$F_{dp} = (D_k - D_g - D_n - O - H) \cdot F_{cm} \cdot K_{cm},$$

$$F_{\partial p} = (365 - 118 - 28 - 7) * 1 * 8 = 1696 \text{ ч},$$

де О - середня кількість днів відпусток на рік (28 днів),

Н – середня кількість днів невиходів на роботу з поважної причини (7 днів).

$$R_0 = 10000 * 0,14 / 1696 * 0,9 = 0,92$$

Отже приймаємо кількість операторів установки МІО  $R_0 = 1$ .

Для оператора установки МІО приймаємо погодинну оплату праці з місячною ставкою у розмірі 12000 грн.

Таким чином річний фонд оплати праці оператора становить:

$$\Phi_o = 12000 * 12 = 144000 \text{ грн}$$

Сумарно прямі витрати на використання МІО при виготовленні нервюр літаків будуть становити:

$$B_n = A + E_y + \Phi_o$$

$$B_n = 60000 + 14300 + 144000 = 218300 \text{ грн.}$$

Розрахуємо зниження собівартості виробів при заявленому у попередніх главах роботи зменшенні товщини вихідної заготовки за рахунок зміцнення слабких місць за технологією МІО:

Площа заготовки для виготовлення виробу-представника (нервюри) становить:

$$S_3 = 823 * 224 = 0,18 \text{ м}^2$$

Плотність матеріалу нервюри Д16  $\rho = 2770 \text{ кг/м}^3$

Отже вага заготовки для виробу з листа завтовшки  $t_1=1$  мм буде становить:

$$M_1 = S_3 * \rho * t_1$$

$$M_1 = 0,18 * 0,001 * 2770 = 0,5 \text{ кг}$$

Вага заготовки для виробу з листа завтовшки  $t_{0,8}=0,8$  мм буде становить:

$$M_{0,8} = S_3 * \rho * t_{0,8}$$

$$M_{0,8} = 0,18 * 0,0008 * 2770 = 0,4 \text{ кг}$$

Таким чином економія матеріалу на річну програму буде дорівнювати:

$$E_M = (M_1 - M_{0,8}) * n * B_M,$$

де  $M_1$ ,  $M_{0,8}$  - вага виробу з листа завтовшки 1 мм та 0,8 мм відповідно;

$n$  – річна програма випуску;

$B_M = 470$  грн/кг - вартість 1 кг листового Д16.

$$E_M = (0,5 - 0,4) * 10000 * 470 = 470000 \text{ грн.}$$

Різниця між прямими витратами та економією матеріалу становить  $470000 - 218300 = 251700$  грн на рік.

Таким чином можна зробити висновок, що введення додаткової операції до технології виготовлення деталей типу нервюр є економічно обґрунтованим.

## **РОЗДІЛ 4. Розробка стартап-проекту**

Стартап-проект створюється з метою створення та розвитку нового бізнесу чи організації, що пропонує інноваційний продукт, послугу чи рішення на ринку.

Причини, з яких люди та компанії вирішуються на запуск стартапу наступні:

1. Стартапи часто прагнуть внести нововведення на ринок та запропонувати щось унікальне. Інновації можуть стосуватися технології, продукту, бізнес-моделі або способу надання послуг.

2. Багато стартапів починаються з ідеї вирішення конкретної проблеми, з якою стикаються потенційні клієнти.

3. Стартапи можуть створюватись у разі наявності високого потенціалу зростання та прибутковості, особливо якщо вони створюються у зростаючій галузі.

4. Запуск власного стартап-проекту може дати підприємцям незалежність та контроль над своїм бізнесом.

5. Успішні стартап-проекти можуть масштабуватись і стати великими компаніями, що відкриває можливість для значного прибутку та впливу.

6. Багато стартапів залучають інвестиції від венчурних капіталістів та ангельських інвесторів, щоб фінансувати розвиток та зростання.

### **4.1 Опис ідеї стартап-проекту**

На сучасному етапі розвиток авіаційної техніки веде до створення нових моделей літальних апаратів. Зазнають змін конструкції крил, фюзеляжу та інших частин. Важливим напрямком розвитку авіабудування є зниження металоємності, полегшення конструкції, підвищення надійності всіх вузлів літальних апаратів.

Наразі в авіабудуванні найчастіше як технологія зі зміцнення виробів використовують дробоструйну обробку, що має низку недоліків:

Під час дробоструйної обробки можуть утворюватися абразивні частинки, які можуть потрапити всередину компонентів і систем повітряних суден, що становить загрозу для їхньої надійності та безпеки.

Дробоструйна обробка вимагає досвіду і кваліфікації операторів. Недолік досвіду або неправильне застосування методу може збільшити ризики надлишку обробки, що може призвести до втрати розмірів або критичних характеристик компонентів.

Процес дробоструйної обробки пов'язаний з утворенням небезпечних відходів, таких як забруднені абразивні матеріали і пил. Це створює проблеми з утилізацією та захистом навколишнього середовища.

Дробоструйна обробка може бути дорогим процесом, і вимагає обслуговування і заміни абразивних матеріалів, що збільшує операційні витрати.

Як усунення цих недоліків пропонується використовувати можливості магнітно-імпульсної обробки, а саме магнітно-імпульсного зміцнення. Цей метод ґрунтується на взаємодії електромагнітних полів, що виникають в індукторі та самій деталі.

Основними перевагами цього методу зміцнення є: значне підвищення міцності, зносостійкості та корозійностійкості, підвищення втомної стійкості матеріалу деталей, рівномірне і передбачуване зміцнення, відсутність шкідливих виробничих факторів.

Таблиця 5

## Опис ідеї стартап-проекту

| Зміст ідеї                                                                                    | Напрямки застосування        | Переваги для користувача                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| Впровадження в технологію виготовлення деталей літаків операцій магнітно-імпільного зміцнення | Підвищення міцності          | Можливість зменшити металомісткість               |
|                                                                                               | Підвищення зносостійкості    | Підвищення надійності                             |
|                                                                                               | Підвищення втомної стійкості | Підвищенням безпеки експлуатації виробів в цілому |

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї приведений в таблиці 6, де визначається перелік слабких (W), сильних (S) та нейтральних (N) характеристик та властивостей ідеї проекту для формування його конкурентоспроможності.

Таблиця 6

## Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

| № | Техніко-економічні характеристики ідеї проекту | (потенційні) товари/концепції конкурентів |              |              | W(слабка сторона) | N(нейтральна сторона) | S(сильна сторона) |
|---|------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
|   |                                                | Мій проект                                | Конкурент №1 | Конкурент №2 |                   |                       |                   |
| 1 | Експлуатаційний ресурс                         | високий                                   | середній     | високий      |                   | +                     |                   |
| 2 | Зменшення металоємності                        | високе                                    | середнє      | низьке       |                   | +                     |                   |

|   |                     |         |         |        |  |   |   |
|---|---------------------|---------|---------|--------|--|---|---|
| 3 | Стабільність якості | висока  | середня | висока |  |   | + |
| 4 | Продуктивність      | висока  | низька  | низька |  |   | + |
| 5 | Вартість            | середня | середня | висока |  | + |   |

#### 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Технологічний аудит проекту - це процес оцінки та аналізу технічних аспектів та рішень, що використовуються у проекті або запропонованих для його виконання. Метою технологічного аудиту є виявлення сильних та слабких сторін технічної складової проекту, а також надання рекомендацій щодо оптимізації технічних рішень, покращення ефективності та зниження ризиків.

Таблиця 7

#### Технологічний аудит проекту

| № | Ідея проекту                                                                                                                                            | Технології реалізації                                                             | Наявність технологій | Доступність технологій |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------|
| 1 | Підвищення експлуатаційного ресурсу, та можливість зменшення металомісткості за рахунок підвищення міцності методом магнітно-імпульсної обробки деталей | Послуги кооперації по підвищенню міцності виробів                                 | +                    | -                      |
| 2 | Підвищення експлуатаційного ресурсу, та можливість зменшення металомісткості за рахунок підвищення міцності методом магнітно-імпульсної                 | Впровадження в технологію на підприємстві операції по електромагнітному зміцненню | +                    | +                      |

|  |                 |  |  |  |
|--|-----------------|--|--|--|
|  | обробки деталей |  |  |  |
|--|-----------------|--|--|--|

Технологічна реалізація проекту шляхом впровадження магнітно-імпульсного зміцнення в технологію на підприємстві операції по електромагнітному зміцненню є більш перспективною з точки зору доступності технологій. Тому зупиняємось на варіанті 2 таблиці 7.

### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз ринкових можливостей стартап-проекту - це процес вивчення та оцінки ринку, на якому планується пропонувати продукт чи послугу, з метою визначення потенціалу та життєздатності даного проекту на ринку. Цей аналіз дозволяє підприємцям та інвесторам краще зрозуміти, чи є попит на запропоноване рішення, хто є цільовою аудиторією, і які будуть умови конкуренції.

Таблиця 8

#### Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| № | Показники стану ринку (найменування)                | Характеристика                                                |
|---|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1 | Кількість головних гравців                          | 5+                                                            |
| 2 | Загальний обсяг продаж на рік, грн/ум.од            | -                                                             |
| 3 | Динаміка ринку                                      | Зростає                                                       |
| 4 | Наявність обмежень для входу                        | Дефіцит кадрів та обладнання                                  |
| 5 | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації | Відповідність електромагнітним стандартам, стандартам безпеки |

|   |                                          |   |
|---|------------------------------------------|---|
| 6 | Середня норма рентабельності в галузі, % | - |
|---|------------------------------------------|---|

Отже можна зробити висновок що ринок України для цього стартапу дуже привабливий адже практично не має конкурентів які б використовували технологію магнітно-імпульсного зміцнення у промислових об'ємах.

Визначимо потенційні групи клієнтів, їх характеристики та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи. Дані зведемо до таблиці 9.

Таблиця 9

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| № | Потреба, що формує ринок            | Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку) | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів | Вимоги споживачів до товару                                          |
|---|-------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1 | Підвищення експлуатаційного ресурсу | Авіаційні підприємства                     | Вимоги до підвищення гарантійного строку експлуатації             | Вимоги міцності, корозійної стійкості та гарантованої працездатності |
| 2 | Зменшення металомістності           | Авіаційні підприємства                     | Вимоги до зменшення собівартості                                  | Зменшення загальної ваги виробу                                      |

Розглянемо фактори які сприяють впровадженню проекту, та які перешкоджають (таблиця 10-11).

Таблиця 10

Фактори загроз проекту

| № | Фактор             | Зміст загрози                            | Можлива реакція компанії                                                              |
|---|--------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Спад виробництва   | Відсутність кадрів, зменшення попиту     | Вдосконалення існуючої продукції, співпраця із технологічними гігантами даної області |
| 2 | Зростання інфляції | Зростання цін, падіння попиту на послугу | Гнучка політика ціноутворення                                                         |

Таблиця 11

Фактори можливостей проекту

| № | Фактор               | Зміст можливості                           | Можлива реакція компанії                              |
|---|----------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1 | Внутрішня інтеграція | Підвищення масштабів підприємства          | Збільшення виробничих потужностей, обмін технологіями |
| 2 | Зростання інфляції   | Кризові явища на підприємствах конкурентів | Збільшення кількості інвестицій                       |

|   |                                           |                                         |                                     |
|---|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| 3 | Державні інвестування у машинобудівництво | Інвестування з метою підтримки розвитку | Розширення у інші сфери виробництва |
|---|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|

Визначимо загальні риси конкуренції на ринку (таблиця 12).

Таблиця 12

#### Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| Особливості конкурентного середовища  | В чому проявляється дана характеристика | Вплив на діяльність підприємства                                                                           |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Тип конкуренції                    | монополістична                          | цей напрямок практично не розвинений, тому конкуренція практично відсутня                                  |
| 2. За рівнем конкурентної боротьби    | локальний                               | є важливою частиною місцевої економіки та може впливати на бізнес-стратегії та взаємодію місцевих компаній |
| 3. За галузевою ознакою               | внутрішньогалузева                      | відмінності у виробничих затратах із іншими підприємствами: підвищення якості і зменшення ціни             |
| 4. Конкуренція за видами товарів      | товарно-видова конкуренція              | послуги задовольняють одну і ту ж основну потребу, але мають різні характеристики або властивості          |
| 5. За характером конкурентних переваг | цінова, нецінова                        | підвищення експлуатаційних властивостей, зменшення собівартості                                            |
| 6. За інтенсивністю                   | немарочна                               | немає виражених брендів або різниці в                                                                      |

|  |  |                                                                                  |
|--|--|----------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | репутації, споживачі визначають свій вибір, базуючись переважно на ціні і якості |
|--|--|----------------------------------------------------------------------------------|

Проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера (таблиця 13).

Таблиця 13

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| Складові аналізу | Прямі конкуренти в галузі | Потенційні конкуренти                                     | Постачальники                               | Клієнти                                               | Товари-замінники                          |
|------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                  | -                         | Підприємства кооперуючи з авіапромисловістю               | -                                           | Вузькогалузеві                                        | Послуга дробеструйного зміцнення          |
| Висновки         | -                         | Невисокий ціновий бар'єр обладнання для входження в ринок | Технологія МІО майже не потребує постачання | Клієнт робить вибір по співвідношенню вартість-якість | МІО має значні переваги по ціні та якості |

За даними таблиці 13 можна зробити висновок що послуга магнітно-імпульсного зміцнення є конкурентоспроможною, та має такі сильні сторони як якість й помірна вартість.

Визначимо та обґрунтуємо фактори конкурентоспроможності (таблиця 14).

Таблиця 14

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| № | Фактор конкурентоспроможності                    | Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим) |
|---|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Безпечність застосування                         | Немає обмежень для застосування у різних галузях                                                    |
| 2 | Простота використання                            | Не потребує тривалого навчання обслуговуючого персоналу                                             |
| 3 | Відсутність механічного впливу на матеріал       | Можливість працювати з досить м'якими матеріалами                                                   |
| 4 | Підвищення експлуатаційних характеристик виробів | Завоювання і утримання конкурентних позицій на ринку                                                |
| 5 | Можливість зменшення металоємності               | Економія матеріалу, зменшення загальної вартості виробу                                             |
| 6 | Низька собівартість процесу                      | Практично відсутня конкуренція серед наявних методів зміцнення                                      |

За визначеними факторами конкурентоспроможності (таблиця 14) проводимо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту по впровадженню магнітно-імпульсного зміцнення.

Таблиця 15

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

| № | Фактор конкурентоспроможності                    | Бали 1-20 | Рейтинг послуги у порівнянні з конкурентами |    |    |   |    |    |    |
|---|--------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------|----|----|---|----|----|----|
|   |                                                  |           | -3                                          | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| 1 | Безпечність застосування                         | 10        |                                             |    |    |   |    | +  |    |
| 2 | Простота використання                            | 15        |                                             |    |    |   |    |    | +  |
| 3 | Відсутність механічного впливу на матеріал       | 10        |                                             |    |    |   | +  |    |    |
| 4 | Підвищення експлуатаційних характеристик виробів | 8         |                                             |    |    | + |    |    |    |
| 5 | Можливість зменшення                             | 9         |                                             |    |    | + |    |    |    |

|   |                             |   |  |  |  |  |   |  |  |
|---|-----------------------------|---|--|--|--|--|---|--|--|
|   | металоемності               |   |  |  |  |  |   |  |  |
| 6 | Низька собівартість процесу | 7 |  |  |  |  | + |  |  |

Проведемо аналіз ринкових можливостей стартап-проекту за допомогою SWOT-аналізу у (матриця Strength-Weak-Troubles-Opportunities (Сильних-Слабких-Загроз-Можливостей) на основі визначених загроз та можливостей ринку, його негативних і позитивних сторін (таблиця 16).

Таблиця 16

#### SWOT- аналіз стартап-проекту

|                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Сильні сторони:</b></p> <p>Безпечність застосування технології</p> <p>Підвищення експлуатаційних характеристик виробів</p> <p>Можливість зменшення металоемності виробів</p> <p>Простота використання</p> | <p><b>Слабкі сторони:</b></p> <p>Мало відома технологія</p> <p>Можливий дефіцит налагоджувальників процесу</p>                                                |
| <p><b>Можливості:</b></p> <p>Заняття порожньої ніші виробництва</p> <p>Розширення послуги у різні сфери виробництва</p>                                                                                         | <p><b>Загрози:</b></p> <p>Поява конкурентів</p> <p>Зменшення попиту</p> <p>Нестабільні стихійні ситуації в країні.</p> <p>Нестабільна економічна ситуація</p> |

На основі SWOT-аналізу розробляються стратегічні рекомендації та плани дій для підприємства, організації або проекту. SWOT-аналіз допомагає зрозуміти внутрішні та зовнішні фактори, які впливають на стан і можливості суб'єкта і визначають оптимальні шляхи розвитку.

#### 4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Зробимо опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 17)

Таблиця 17

Вибір цільових груп потенційних споживачів

| № | Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів | Готовність споживачів сприйняти продукт | Орієнтовний попит в межах цільової групи | Інтенсивність конкуренції в сегменті | Простота входу у сегмент |
|---|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1 | Підприємства авіаційної промисловості            | Середня                                 | Високий                                  | Низька                               | Середня                  |

Продовження таблиці 17

|   |                              |         |          |        |        |
|---|------------------------------|---------|----------|--------|--------|
| 2 | Інструментальні підприємства | Середня | Високий  | Низька | Висока |
| 3 | Ремонтні підприємства        | Низька  | Середній | Низька | Висока |

На основі аналізу цільових груп обираємо як найбільш перспективну для розвитку 1 групу - підприємства авіаційної промисловості. Відповідно до обраної групи визначаємо стратегію розвитку.

Таблиця 18

Визначення базової стратегії розвитку

| № | Стратегія охоплення ринку | Ключові конкурентоспроможні позиції                                 | Базова стратегія розвитку |
|---|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1 | Концептований маркетинг   | Сконцентрованість на вдосконаленні якості послуги для обраної групи | Стратегія спеціалізації   |

Обираємо стратегію конкурентної поведінки (таблиця 19).

Таблиця 19

### Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

| № | Чи є проект «першопрохідцем» на ринку? | Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів? | Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які? | Стратегія конкурентної поведінки |
|---|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | Так                                    | Ні                                                                             | Ні                                                                          | Розширення первинного попиту     |

Розробляємо стратегію позиціонування (таблиця 20), що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 20

### Визначення стратегії позиціонування

| № | Вимоги до товару цільової аудиторії          | Базова стратегія розвитку | Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту | Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію |
|---|----------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1 | Підвищення експлуатаційної стійкості виробів | Стратегія спеціалізації   | Інноваційність рішення, можливість зменшення металомістності | Підвищення міцності, стійкості, стабільність результату  |

## 4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Підсумуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 21

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| № | Потреба                                                                   | Вигода, яку пропонує товар                   | Ключові переваги перед конкурентами                                |
|---|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 1 | Підвищення експлуатаційних характеристик деталей авіаційної промисловості | Швидке підвищення міцності та зносостійкості | Безопасність процесу, швидкість виконання, прогнозований результат |

Розробляємо трирівненву маркетингову модель товару (таблиця 22)

Таблиця 22

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| Рівні товару                   | Сутність та складові                                                                 |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Товар за задумом            | Підвищення експлуатаційних характеристик деталей авіаційної промисловості            |
| 2. Товар у реальному виконанні | Підвищення межі міцності<br>Підвищення втомної міцності<br>Підвищення зносостійкості |
| 3. Товар із підкріпленням      | Тестове виконання, гарантія                                                          |

Визначимо цінові межі послуги зміцнення (таблиця 23)

Таблиця 23

Визначення меж встановлення ціни

| № | Рівень цін на | Рівень цін на | Рівень доходів | Верхня та нижня |
|---|---------------|---------------|----------------|-----------------|
|---|---------------|---------------|----------------|-----------------|

|   | товари-<br>замінники | товари-<br>аналоги | цільової групи<br>споживачів | межі вста-<br>новлення ціни на<br>товар/послугу |
|---|----------------------|--------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1 | -                    | -                  | -                            | 200 – 1500 грн                                  |

Далі йде визначення оптимальної системи збуту, за якою приймаються подальші кроки (таблиця 24).

Таблиця 24

#### Формування системи збуту

| № | Специфіка<br>закупівельної<br>поведінки<br>цільових<br>клієнтів         | Функції збуту,<br>які має<br>виконувати<br>постачальник<br>послуги | Глибина каналу<br>збуту                | Оптимальна<br>система збуту                                                       |
|---|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Цільові клієнти<br>заказують<br>послугу в<br>спеціалізованих<br>центрах | Оповіщення<br>клієнтів,<br>виконання<br>гарантій                   | Постачання<br>послуги своїми<br>силами | Сайти послуг,<br>вбудовування<br>послуги у<br>виробничий<br>процес<br>підприємств |

Розробляємо концепцію маркетингових комунікацій (таблиця 25).

Таблиця 25

#### Формування системи збуту

| № | Специфіка<br>поведінки | Канали<br>комунікацій, | Ключові<br>позиції, | Завдання<br>рекламного | Концепція<br>рекламного |
|---|------------------------|------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|
|---|------------------------|------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|

|   | цільових клієнтів                                                                            | якими користуються цільові клієнти | обрані для позиціонування                  | повідомлення                                    | звернення                                                                                 |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Клієнти дізнаються про послугу з реклами, сайтів послуг, по рекомендаціям, з наукових статей | Інтернет, реклама, научні журнали  | Якість, швидкість, прогнозований результат | Інноваційна технологія, можливості використання | Привернення уваги клієнтів фактичними свідоцтвами про послугу, а також відгуками клієнтів |

## ВИСНОВКИ

Авіаційна промисловість в Україні є важливою складовою національної економіки і має потенціал для подальшого розвитку та розширення співпраці з іншими країнами у сфері авіаційних технологій.

Використання імпульсної енергії знаходить все більше видів застосування в техніці, технології, дослідницькій апаратурі та інших сферах науки та виробництва. Необхідність створення нових конструкцій різного рівня складності зумовлена швидким розвитком промисловості та техніки.

Досвід впровадження установок магнітно-імпульсної обробки металів, у порівнянні з іншими методами зміцнення металевих деталей, визначив багато переваг МІУ:

- покращення характеристик оброблюваного матеріалу; висока продуктивність технологічного процесу МІУ;
- можливість автоматизації та механізації технологічних процесів; простота обслуговування та майже повна відсутність шкідливих чинників для здоров'я операторів при роботі установок (МІУ працюють безшумно, елементи

та вузли установок не потребують змащування, відсутнє агресивне середовище при роботі);

– установки повністю автоматизовані – для керування та контролю роботи достатньо однієї людини.

В даній роботі були розглянуті властивості магнітно-імпульсної обробки які можуть принести позитивний ефект у технології виготовлення деталей авіаційної промисловості, а саме деталей типу нервюр літаків.

В процесі роботи були виконані міцності розрахунки с застосуванням комп'ютерного моделювання навантажень в SolidWorks. Таким чином були виявлені місця виробу, що мають значні навантаження, які в процесі експлуатації можуть призвести до появи небажаних дефектів.

Тому було прийняте рішення впровадити технологію магнітно-імпульсного зміцнення для виключення можливостей появи негативних явищ у такого типу деталей. Окрім того зроблений додатковий розрахунок міцності при зменшенні товщини листа вихідної заготовки, який показав можливість внесення цієї зміни в конструкцію при обов'язковому використанні магнітно-імпульсного зміцнення виробу.

Проведений техніко-економічний аналіз використання операції магнітно-імпульсного зміцнення виявив наявність позитивного економічного ефекти від використання у технології виготовлення магнітно-імпульсної обробки.

Окрім вище означеного можна додати що магнітно-імпульсна обробка може підвищити хімічну стійкість матеріалів, що важливо зниження корозії і хімічного впливу, може покращити втомні та пружні характеристики матеріалів, що робить їх більш надійними у довгостроковій перспективі. Варто також відзначити таку важливу особливість як відсутність використання хімічних речовин або забруднювальних відходів, що робить процес досить екологічно безпечним методом обробки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алифанов А. В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // Литье и металлургия. 2012. № 4. С. 151–155.
2. Алифанов А.В., А.В. Акулов, Попова Ж.А. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка. – Литье и металургія 3(66) 2012 – 77 с.
3. Батигін Ю.В., Лавінський В.І. Імпульсні магнітні поля для сучасних технологій. – Харків: Вид-во НТУ «ХПІ», 2010. – Т. 1. – 272 с.
4. Білий І.В. Інструкція з експлуатації магнітно-імпульсної установки для обробки металів тиском типу МІУ-50/1. - Харків, 1968. - 60 с. 5
5. Білий І.В., Фертік С.М., Хіменко Л.Т. Довідник з магнітно-імпульсної обробки металів. – Харків: Вища шко-ла, 1977. – 168 с.
6. Глущенков В.А, Кур'янов Ю.П. Магнітно-імпульсна обробка матеріалів. Штампування жовальних оболонок: монографія. – Самара: Вид. будинок «Федорів», 2015. – 133 с.
7. Глущенков В.А., Карпукін В.Ф. Технологія магнітно-імпульсної обробки матеріалів: монографія. – Самара: Вид. будинок «Федорів», 2014. – 208 с.
8. Глущенков В.А., Карпукін В.Ф.. Інженерна методика розрахунку процесів магнітно-імпульсної обробки матеріалів: навч. посібник – Самара: Изд. будинок «Федорів», 2018. – 64 с.
9. Горкин, Л. Д. Экспериментальные исследования процесса магнитно-импульсной обработки металлов [Текст] / Л. Д. Горкин, Л.Т. Хименко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. - №7. – С. 4-6.
10. Державний архів Харківської області, ф.Р-1682, оп.13, од. збер. №3456, 1970. – С.20-26. 4
11. Ковалевський С. В. Поверхнева обробка імпульсним магнітним полем деталей машин / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов // Надійність

інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ; Київ. – Вип. № 19. – 2006. – С. 181-185.

12. Конотоп В.В. Влаштування магнітно-імпульсного очищення коронуючих електродів електрофільтрів (пояснювальна записка №40662) / В.В.Конотоп, Л.Т.Хіменко, Ю.С.Огібалов. - Харків, 1988. - 19 с. 6

13. Литвинов В.Г., Черніков Д.Г., Яшкова А.К. Автоматизована інформаційна система розрахунку параметрів процесів магнітно-імпульсної обробки металів // Перспективні інформаційні технології – 2017. – С. 368-372.

14. Лівшиць А.Л. Імпульсна електротехніка. / А.Л.Лівшиць, М.А.Отто. - М.: Вища школа, 1983. -352 с. 1

15. Малигін Б. В. Магнітне зміцнення інструменту та деталей машин / Б. В. Малигін. – М.: Машинобудування, 1989. – 112 с.

16. Малыгин Б. В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. М.: Машиностроение, 1998. 130 с.

17. Наші зоряні роки. 1930-1996 р.р. / І.М.Шептун, В.В.Конотоп, Г.Ф.Нескородов та ін. – Харків: «Колорит», 2012. – 232 с. 2

18. Обробка розплавів магнітно-імпульсними полями з метою управління структурою та властивостями промислових силумінів / К.В. Нікітін, В.І. Нікітін, І.Ю. Тимошкін [та ін.] // Извест-тия вузів. Кольорова металургія. – 2016. – № 2. – С. 34-42.

19. Теоретичне та експериментальне обґрунтування обробки розплавів на основі алюмінію імпульсними магнітними полями / К.В. Нікітін, Є.А. Амосов, В.І. Нікітін [та ін.] // Вісті вузів. Кольорова металургія. – 2015. – №5. – С. 11–19.