

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут Навчально-науковий механіко-машинобудівний

кафедра Технології виробництва літальних апаратів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Технології виробництва літальних апаратів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Антон ЛАВРІНЕНКОВ

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

_____ Турій Владислав Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Розробка технології та оснащення деталі «Крильчатка»

_____ ,

науковий керівник дисертації Борис Руслан Степанович, к.т.н., доц. ,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання),

затверджені наказом по університету від «03» листопада 2023 р. № 5128-с

2. Термін подання студентом дисертації 10.06.2024

3. Об'єкт дослідження Процеси гарячого ізотермічного штампування моноколіс типу крильчатки із аксіальними тонкостінними елементами

4. Вихідні дані 3D модель деталі _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Літературно-патентний огляд джерел процесів ізотермічного формоутворення моноколіс; конструкторсько-технологічний аналіз моноколеса; моделювання процесу формоутворення моноколеса типу крильчатка із аксіальними тонкостінними елементами із алюмінієвого сплаву B95; спроектувати штампове оснащення

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 70-100 сторінок записка; 10-20 слайдів презентації

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Провести літературно-патентний огляд джерел процесів ізотермічного формоутворення моноколіс	червень-серпень 2023	
2.	Виконати конструкторсько-технологічний аналіз деталі «Крильчатка»	вересень-жовтень 2023	
3.	Провести чисельне моделювання процесу ізотермічного формоутворення моноколеса типу крильчатка із аксіальними тонкостінними елементами із алюмінієвого сплаву B95	листопад-грудень 2023	
4.	Виконати аналіз результатів	січень-березень 2024	
5.	Спроектувати штампове оснащення	квітень-травень 2024	
6.	Оформлення дисертації та захист	червень 2024	

Студент

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(ініціали, прізвище)

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з 77 сторінок, в тексті зазначено 39 малюнків. В даній атестаційній роботі використано 50 найменувань бібліографічних посилань.

Метою роботи є розробка технології виготовлення крильчатки центробіжного компресора методом гарячого штампування та розробка штампового оснащення.

В дисертаційній роботі проведено літературно-патентний огляд джерел процесів ізотермічного формоутворення моноколів, на основі чого сформульовані задачі досліджень.

За допомогою методу скінченних елементів проведено моделювання гарячого ізотермічного формоутворення моноколів типу крильчатки із аксіальними тонкостінними елементами із алюмінієвого сплаву В95 та проаналізовані отримані результати. За результатами проведеного конструкторсько-технологічного аналізу та розрахунку чисельними методами процесу ізотермічного штампування моноколів типу крильчатки із аксіальними тонкостінними елементами спроектовано штампове оснащення.

Ключові слова: ізотермічне штампування, моноколеса, крильчатка, метод скінченних елементів, газотурбінний двигун, силові режими, напружено-деформований стан, алюмінієві сплави, гаряче штампування.

ABSTRACT

The master's thesis consists of 77 pages, 39 figures are indicated in the text. 50 names of bibliographic references are used in this attestation work.

The purpose of the work is the development of the technology of manufacturing the impeller of the centrifugal compressor by the method of hot stamping and the development of stamping equipment.

In the dissertation, a literature and patent review of the sources of isothermal molding of unicycles was carried out, on the basis of which research tasks were formulated.

Hot isothermal molding of impeller-type monowheels with axial thin-walled elements made of V95 aluminum alloy was simulated using the finite element method, and the obtained results were analyzed. According to the results of the design and technological analysis and calculation by numerical methods of the process of isothermal stamping of impeller-type monowheels with axial thin-walled elements, the stamping equipment was designed.

Key words: isothermal stamping, monowheel, impeller, finite element method, gas turbine engine, power modes, stress-strain state, aluminum alloys, hot stamping.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОСНАЩЕННЯ ДЕТАЛІ

«КРИЛЬЧАТКА»

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	
ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ПРОЦЕСІВ ІЗОТЕРМІЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «КРИЛЬЧАТКА».....	12
1.1 Конструкція моноколів авіаційних двигунів.....	12
1.2 Крильчатка центробіжного компресора.....	18
1.3 Існуючі технології виготовлення деталей типу моноколесо (крильчатка). Теоретичні відомості.....	20
1.4 Існуючі технології виготовлення деталей типу моноколесо (крильчатка). Огляд літературних джерел.....	27
1.5 Особливості гарячого ізотермічного формування моноколів....	44
1.6 Висновки по розділу 1 та постановка задачі досліджень.....	46
РОЗДІЛ 2	
РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЇЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ДЕТАЛІ «КРИЛЬЧАТКА»	47
2.1 Конструкторсько-технологічний аналіз деталі «Крильчатка»...	47
2.2 Розробка технології виготовлення деталі моноколеса типу крильчатка радіальна.....	49
2.3 Висновки по розділу.....	51

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ЧИСЕЛЬНИМИ МЕТОДАМИ ГАРЯЧОГО ІЗОТЕРМІЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛІ КРИЛЬЧАТКА ІЗ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ В95 ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ DEFORM.....	52
---	----

3.1 Розрахункова схема процесу гарячого ізотермічного штампування при моделюванні методом скінченних елементів (МСЕ) та задані граничні умови.....	52
3.2 Результати комп'ютерного моделювання за допомогою МСЕ процесу гарячого ізотермічного штампування деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами.....	56
3.3 Висновки по розділу.....	65

РОЗДІЛ 4

КОНСТРУЮВАННЯ ШТАМПОВОГО ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ІЗОТЕРМІЧНОГО ШТАМПУВАННЯ ВИКОВУ ДЕТАЛІ «КРИЛЬЧАТКА».....	66
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70
ДОДАТОК. СПЕЦИФІКАЦІЯ.....	76
Штампове оснащення для пресування деталі Крильчатка.....	77

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГТД – газотурбінний двигун
ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння
ЕХО – електрохімічна обробка
ЕЕО – електроерозійна обробка
ЧПУ – чисельне програмне управління
КП – керуюча програма
ГП – гаряче ізостатичне пресування
ГПД – гаряча пластина деформація
МСЕ – метод скінченних елементів
ОМТ – обробка металів тиском
НДС – напружено-деформований стан
САПР – система автоматизованого проектування
 P_d – зусилля деформування
 V_d – швидкість деформування
 μ – коефіцієнт тертя
 σ_i – інтенсивність напружень
 ε_i – інтенсивність деформацій
 T – температура

ВСТУП

Актуальність теми. Тема виготовлення крильчатки центробіжного компресора методом гарячого штампування є актуальною з кількох причин:

- **Ефективність компресорів:** Компресори є ключовими компонентами багатьох промислових систем, включаючи системи кондиціонування повітря, холодильні установки, турбореактивні двигуни та інші. Виробництво ефективних компресорів має велике значення для забезпечення оптимальної продуктивності цих систем. Виготовлення крильчаток центробіжних компресорів методом гарячого штампування може забезпечити високу точність геометрії, міцність та мінімальну втрату енергії, що сприяє покращенню ефективності компресорів.

- **Висока якість та надійність:** Крильчатки компресорів піддаються великим механічним та термічним навантаженням. Виготовлення крильчаток методом гарячого штампування дозволяє отримати високу якість виробу з високою міцністю та довговічністю. Цей метод дозволяє отримати однорідну структуру матеріалу, що забезпечує високу міцність та запобігає появі тріщин та деформацій.

- **Економічність виробництва:** Метод гарячого штампування дозволяє виготовляти крильчатки швидко та ефективно у великих обсягах. Він має високу продуктивність та дозволяє знизити витрати на виробництво порівняно з іншими технологіями. Крім того, гаряче штампування дозволяє використовувати меншу кількість матеріалу, оскільки відбувається мінімізація втрат матеріалу під час обробки. Це сприяє зниженню витрат на сировину і енергію, забезпечуючи економічність виробництва.

- **Гнучкість дизайну:** Метод гарячого штампування дозволяє створювати крильчатки зі складною геометрією, які відповідають конкретним потребам і вимогам компресорних систем. Це дозволяє виробляти крильчатки

з оптимальною формою, що забезпечує максимальну ефективність компресора та зниження шуму та вібрацій.

- **Сталість попиту:** Потреба в компресорах присутня в різних галузях промисловості, включаючи енергетику, нафтову та газову промисловість, автомобільну та авіаційну промисловість, хімічну промисловість та багато інших. Оскільки компресори мають широке застосування, попит на крильчатки центробіжних компресорів залишається стійким і постійним.

Отже, актуальність теми виготовлення крильчатки центробіжного компресора методом гарячого штампування обумовлена потребою у високоефективних та надійних компресорах, економічністю виробництва, гнучкістю дизайну та сталістю попиту на ці продукти в промисловому секторі.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка технології виготовлення крильчатки центробіжного компресора методом гарячого штампування та розробка штампового оснащення.

Задачі дослідження.

1. Провести літературно-патентний огляд джерел процесів ізотермічного формоутворення моноколів. Розглянути конструкції моноколів авіаційних двигунів та існуючі технології їх виготовлення. Проаналізувати особливості ізотермічного формоутворення моноколів при температурах гарячої пластичної деформації (ГПД).

2. Виконати конструкторсько-технологічний аналіз деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами та розробити технологію її виготовлення методами гарячого штампування.

3. Провести розрахунок комп'ютерними чисельними методами гарячого ізотермічного формоутворення деталі моноколеса типу крильчатка із алюмінієвого сплаву В95 та проаналізувати отримані результати.

Об'єкт дослідження. Процеси гарячого ізотермічного штампування моноколів типу крильчатки із аксіальними тонкостінними елементами.

Предмет дослідження. Вплив конструктивних та технологічних факторів на процес гарячого ізотермічного штампування моноколів типу крильчатки із аксіальними тонкостінними елементами.

Методи дослідження. Дослідження впливу конструктивних та технологічних факторів на процес гарячого ізотермічного штампування моноколів типу крильчатки із аксіальними тонкостінними елементами проведені з використанням чисельного метода скінченних елементів (МСЕ) та програмного комплексу DEFORM.

Наукова новизна одержаних результатів:

Проведено розрахунок чисельними методами гарячого ізотермічного формоутворення деталі моноколеса типу крильчатка із аксіальними тонкостінними елементами із алюмінієвого сплаву В95.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Встановлені енергосилові параметри та напружено-деформованого стану (НДС) при формоутворенні моноколів типу крильчатка із аксіальними тонкостінними елементами із алюмінієвого сплаву В95 в умовах ізотермічного штампування.

2. Розроблена конструкція штампу для гарячого ізотермічного штампування деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ПРОЦЕСІВ ІЗОТЕРМІЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «КРИЛЬЧАТКА»

1.1. Конструкція моноколіс авіаційних двигунів.

Сучасна техніка використовує велику кількість різних типів двигунів, проте найбільша увага зосереджена на авіаційних газотурбінних двигунах (ГТД). Ці двигуни належать до теплових, де енергія, що міститься в стиснутому і нагрітому газі, перетворюється на механічну роботу на валу газової турбіни. На рис. 1.1 показаний типовий ГТД.

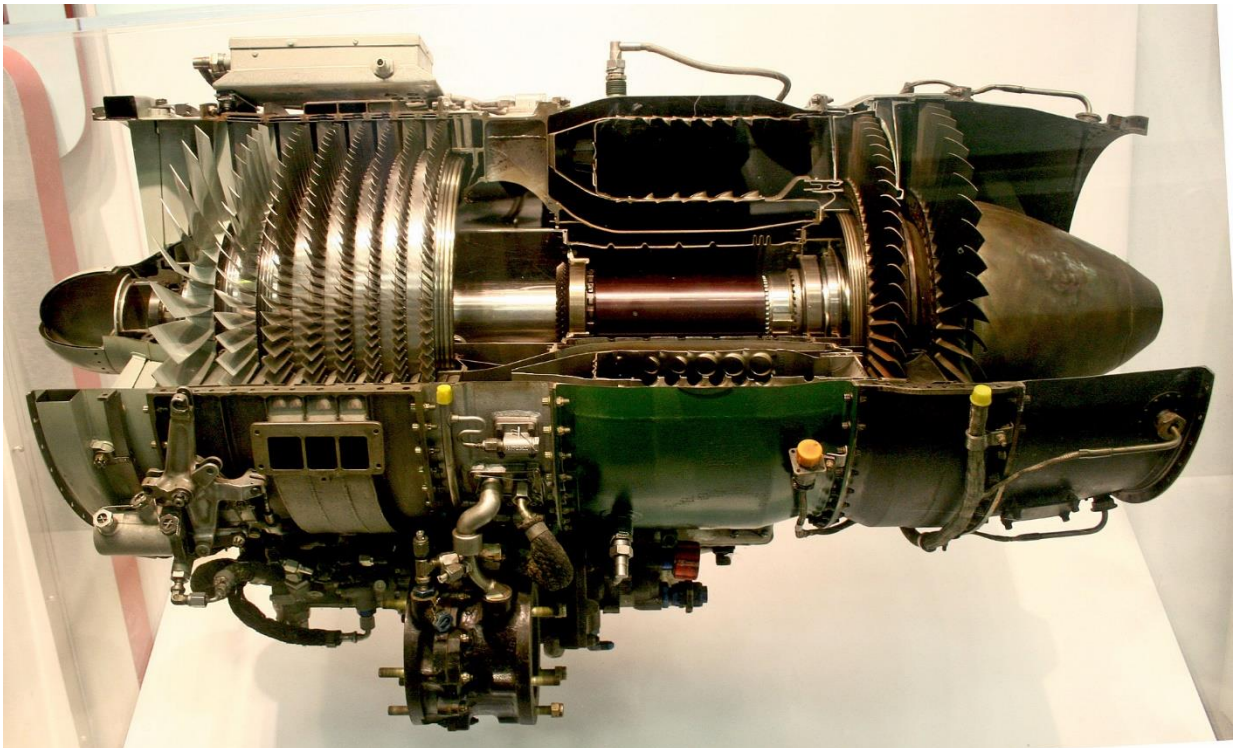


Рис.1.1. Газотурбінний двигун (ГТД).

Газотурбінні двигуни знаходять широке застосування в авіації (літаки, вертольоти, крилаті ракети, безпілотні літальні апарати), на землі (промислове обладнання, транспортні засоби) та на морі (морські судна, військові кораблі, екраноплани, платформи для видобутку нафти і газу). Наразі авіаційні двигуни

становлять 70 % від загального світового виробництва газотурбінних двигунів у грошовому вираженні, а наземні та морські – близько 30 % [1].

У сучасній цивільній і військовій авіації газотурбінні двигуни майже повністю замінили поршневі двигуни, ставши домінуючими. Їх широке застосування в енергетиці, промисловості та транспорті обумовлене вищою енерговіддачею, компактністю і малою вагою порівняно з іншими типами силових установок. Високі питомі характеристики ГТД досягаються завдяки їх конструктивним особливостям та термодинамічному циклу. Хоча цикл ГТД включає ті ж основні процеси, що і цикл поршневих двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), він має значні відмінності. У поршневих двигунах процеси відбуваються послідовно в одному елементі — циліндрі, тоді як у ГТД ці процеси протікають одночасно і безперервно в різних елементах двигуна. Завдяки цьому в газотурбінних двигунах відсутня така нерівномірність умов роботи елементів, як у поршневих, а середня швидкість і масовий витрата робочого тіла в 50-100 разів вища. Це дозволяє створювати компактні ГТД великої потужності [2-4].

У сучасній авіаційній техніці довговічність і надійність авіаційних двигунів значною мірою залежать від якості їх компонентів. Тому до цих компонентів висуваються суворі вимоги щодо механічних характеристик і точності виготовлення. Одним із ключових завдань при проектуванні роторів газотурбінних двигунів для авіації є забезпечення максимальної надійності та тривалого терміну служби при мінімальній вазі конструкції [5-7].

У ГТД енергія газу передається для стискання або вилучається для отримання корисної роботи на валу турбіни шляхом взаємодії газу з лопатками спеціальної форми. Ці лопатки можуть бути розміщені на окремих дисках або інтегровані з ними. Лопатки мають точну аеродинамічну форму (рис. 1.2).



Рис.1.2. Турбінна лопатка.

Лопатки є тонкостінними елементами, які конструктивно об'єднані з масивними компонентами. Моноколесо (бліск) є типовим прикладом складних деталей з тонкостінними елементами, до яких висуваються високі вимоги щодо якості та надійності. Моноколесо (рис. 1.3) представляє собою ступінь компресора (робоче колесо), де лопатки аеродинамічної форми є інтегрованими з диском ротора в єдину конструкцію.

Використання деталей типу моноколiс у роторі будь-якого типу дозволяє значно знизити масу конструкції, навіть до 25%, і збільшити критичну кількість обертів. Це стає можливим завдяки відсутності потреби у замкових з'єднаннях між лопатками та диском. Для виготовлення моноколiс зазвичай

використовують алюмінієві сплави, такі як АК4-1, АК6, ВД-17, В95 або титанові сплави, такі як ВТ3-1, ВТ5-1, ВТ6, ВТ8, ВТ25.



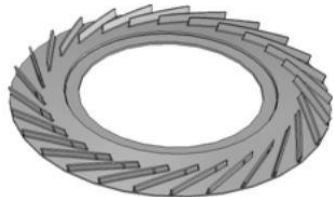
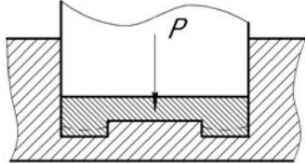
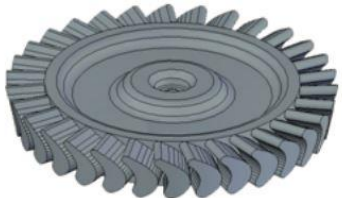
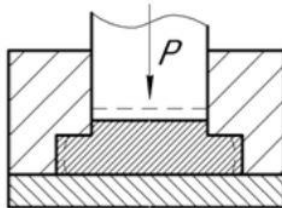
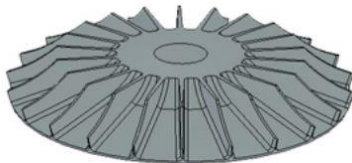
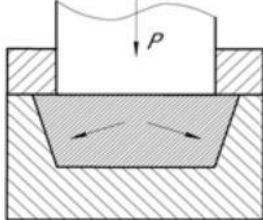
Рис.1.3. Моноколесо компресора.

Особливості форми поверхонь елементів схем деформації при виготовленні цільноштампованих робочих коліс лопаткових машин визначають конструктивно-технологічні особливості при їх класифікації. Ця класифікація сприяє системному підходу до дослідження та розробки

технологічних процесів у багатороз'ємних (багатоканальних) штампах для виготовлення робочих коліс лопаткових машин. Моноколеса в залежності від функціонального призначення за ознакою конструктивною поділяються на такі типи, що відрізняються взаємним розташуванням пера лопатки разом з диском [8-13].

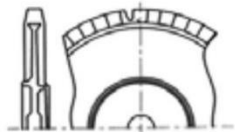
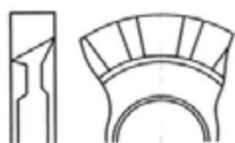
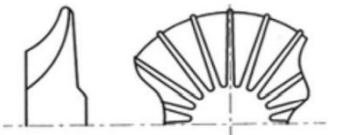
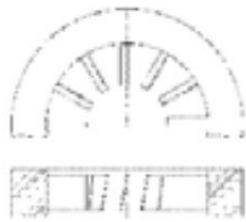
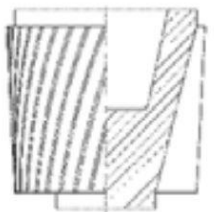
Згідно [8] конструкторсько-технологічна класифікація моноколес в залежності від функціонального призначення по конструктивній ознаці поділяє їх на типи, які відрізняються взаємним розташуванням пера лопатки із диском (табл. 1.1). В роботі представлені основні класи моноколес, які відрізняються розташуванням елементів лопаток відносно конструктивної осі обертання деталі: співвісно з віссю, з радіальним розташуванням та під кутом до осі. Кожен клас має підкласи, які розділяють номенклатуру елементів лопаток моноколеса по формі поверхні (плоскі, одинарної кривизни та подвійної кривизни).

Табл. 1.1. Конструкторсько-технологічний класифікатор моноколес

Конструктивна ознака (розташування пера)	Типовий представник	Технологічна ознака	Схема процесу формоутворення
Співвісно з віссю обертання		Аксіальне пресування пера лопатки	
Перпендикулярно осі обертання		Радіальне пресування пера лопатки	
Під кутом до осі (змішаний тип)		Пресування пера лопатки при комбінованій течії металу	

В роботі [14] автор представив класифікацію штампованих робочих моноколів, яку показано в табл. 1.2.

Табл. 1.2. Класифікація моноштампованих робочих моноколів

Тип	Вид	Група Форма аеродинамічної поверхні	Ескіз типового представника
Конструктивні ознаки	Технологічні особливості		
А. Осьові (заборники)	1. Відкриті міжлопаточні канали. Бокове видавлювання	1. Лінійна поверхня ступиці	
		2. Складнофасонна поверхня ступиці	
Б. Радіальні (дифузори)	2. Відкриті міжлопаточні канали. Бокове видавлювання	3. Лінійна поверхня лопаток	
В. Радіальні крильчатки	3. Напівзакриті міжлопаточні канали. Комбіноване видавлювання	4. Плоска поверхня лопатки	
		5. Просторова складнофасонна поверхня лопаток	
		6. Із проміжними лопатками	
Г. Направляючі апарати	4. Напіввідкриті міжлопаточні канали. Комбіноване видавлювання	7. Лінійна поверхня лопатки	
Д. Направляючі апарати	5. Закриті міжлопаточні канали. Аксіальне видавлювання	8. Складнофасонна поверхня лопатки	

1.2. Крильчатка центробіжного компресора.

Крильчатка центробіжного компресора є одним з ключових компонентів центробіжного компресора (рис. 1.4).

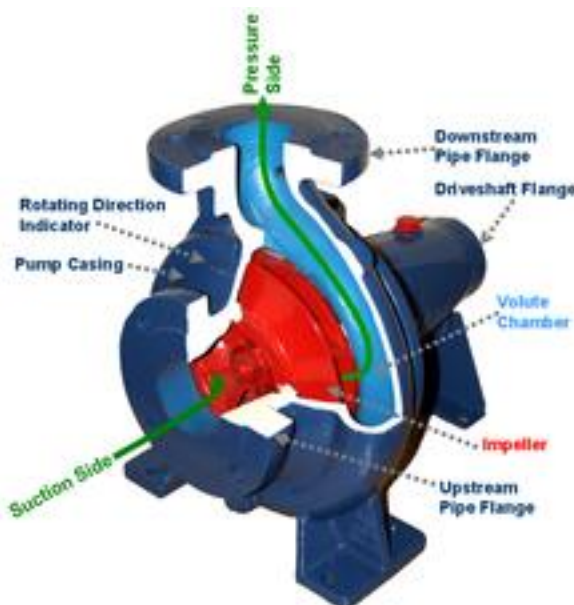


Рис.1.4. Центробіжний компресор.

Вона складається з крил або лопаток, розташованих на обертовому диску або втулці, які відповідають за засмоктування, стискання і рух газу або робочої рідини всередині компресора. Крильчатки центробіжних компресорів використовуються в різних галузях промисловості, включаючи повітряне кондиціонування, охолодження, вентиляцію, турбореактивні двигуни, нафтову та газову промисловість, хімічну промисловість та інші. Вони забезпечують перетворення кінетичної енергії руху робочого середовища в потенційну енергію тиску. Крильчатки центробіжних компресорів мають складну форму, що дозволяє створити оптимальний потік газу або робочої рідини, забезпечуючи ефективну роботу компресора. Вони піддаються значним механічним і термічним навантаженням, тому важливо, щоб вони були виготовлені з високоміцних матеріалів і мали високу точність геометрії.

Крильчатки центробіжних компресорів можуть бути виготовлені за допомогою різних технологій, включаючи гаряче штампування, лиття, фрезерування, складання з окремих лопаток та інші. Кожен метод виготовлення має свої переваги і обмеження з точки зору складності форми, міцності та продуктивності виробництва. Крильчатки відцентрових компресорів використовуються в літаках з турбореактивними та турбогвинтовими двигунами. Ці крильчатки знаходяться всередині компресорного модуля двигуна і відповідають за стиснення повітря, яке потім змішується з паливом і спалюється для створення тяги.

Деякі приклади літаків, в яких використовується крильчатка відцентрового компресора, включають:

- Boeing 737: Крильчатки центробіжного компресора застосовуються у двигунах CFM56 (рис. 1.5), які широко використовуються на Boeing 737.



Рис.1.5. CFM56.

- Airbus A320: У літаках Airbus A320 застосовуються різні типи двигунів, такі як CFM56 та International Aero Engines V2500, які також використовують крильчатки центробіжного компресора.
- Embraer E-Jet: Крильчатки центробіжного компресора використовуються у двигунах Pratt & Whitney PW1000G, встановлених на літаки Embraer E-Jet сімейства E2.
- Bombardier CRJ: У деяких моделях літаків Bombardier CRJ (наприклад, CRJ200) застосовуються двигуни General Electric CF34, які включають крильчатки центробіжного компресора.
- ATR 72: У турбогвинтових літаках ATR 72 застосовуються різні типи двигунів, включаючи Pratt & Whitney Canada PW100, які також використовують крильчатки центробіжного компресора.

Це лише деякі приклади літаків, в яких застосовуються крильчатки центробіжних компресорів. У кожному конкретному літаку можуть використовуватися різні моделі та типи двигунів, які включають крильчатки центробіжного компресора.

1.3. Існуючі технології виготовлення деталей типу моноколесо (крильчатка). Теоретичні відомості.

Існує кілька методів виготовлення крильчатки центробіжного компресора. Основні з них:

- Лиття: цей метод полягає в тому, що розплавлений метал зливається в форму, де затвердіє і стає крильчаткою. Цей метод має деякі недоліки, такі як висока вартість виготовлення форми, складність виробництва і відходи металу.

Мінуси методу. Можливість виникнення нерівномірностей у структурі матеріалу, можливість попадання повітряних порожнин або дефектів у формовану крильчатку.

- Фрезерування: цей метод використовується для виготовлення крильчатки із пластини металу, в яку за допомогою фрезера вирізається форма крильчатки. Цей метод має перевагу в тому, що він дозволяє виготовити крильчатку з точністю до міліметра.

- Листове штампування: цей метод використовується для виготовлення крильчатки з металевого листа, який згинається в потрібну форму. Цей метод має перевагу в тому, що він дозволяє виготовити крильчатку з меншою кількістю відходів металу.

- Гаряче штампування: цей метод полягає в тому, що металева заготовка піддається в спеціальному пресі під високим тиском та температурою, що дозволяє отримати крильчатку потрібної форми та розміру з мінімальною кількістю відходів металу. Цей метод вважається найбільш точним і ефективним для виробництва крильчаток центробіжних компресорів.

- Обробка на верстатах з ЧПУ: цей метод використовується для виготовлення крильчатки з металевго бланка, який зберігається в базі даних комп'ютера. Програмне забезпечення на базі цих даних виконує обробку бланка на верстатах з ЧПУ, що дозволяє отримати крильчатку з високою точністю та повторюваністю.

- Метод 3D-друкування: цей метод використовується для виготовлення крильчатки за допомогою спеціального обладнання, яке здатне надрукувати металевий порошок шар за шаром, поки не утвориться потрібна форма крильчатки. Цей метод дозволяє виготовляти крильчатки складної форми з високою точністю та повторюваністю.

Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки. Вибір методу залежить від вимог до кінцевої продукції, вартості виробництва та доступності обладнання. Гаряче штампування є одним з найбільш точних та ефективних методів виробництва крильчаток центробіжних компресорів.

Щодо мінусів кожного з методів:

Метод обробки на верстатах з ЧПУ:

1. Високі витрати на обладнання: Встановлення та підтримка верстатів ЧПУ можуть бути дорогими, особливо для підприємств з обмеженим бюджетом.
2. Складність програмування: Робота на верстатах ЧПУ вимагає спеціалізованого програмування для керування рухом інструменту. Навчання операторів та програмістів може бути витратним і часоємким.
3. Обмеження щодо геометрії: Верстати ЧПУ мають обмежену можливість обробки складних геометрій, особливо в порівнянні з іншими методами виробництва, такими як лиття або адитивне виробництво.
4. Вимоги до фіксації деталей: Деякі деталі, особливо тонкостінні або складні форми, можуть потребувати спеціальної фіксації на верстаті для забезпечення точності та стійкості під час обробки.
5. Обмеження щодо розмірів: Верстати ЧПУ мають обмежені розміри оброблювального простору, що може обмежувати розміри виготовлюваних деталей.
6. Залежність від програмного забезпечення та технічної підтримки: Верстати ЧПУ вимагають належного програмного забезпечення та технічної підтримки для забезпечення безперебійної роботи. Відсутність або неправильне функціонування програмного забезпечення може призвести до збоїв у виробництві.

Метод лиття:

1. Дефекти та нерівномірності: Під час лиття можуть виникати дефекти, такі як повітряні порожнини, неправильне наповнення форми, погіршення мікроструктури матеріалу, дефекти поверхні та інші. Це може впливати на якість та міцність крильчатки.

2. Обмежені можливості геометрії: Лиття може мати обмежені можливості щодо виготовлення складних геометрій або внутрішніх структур. Деякі складні деталі можуть бути складно або неможливо виготовити литтям.

3. Витрати та обладнання: Лиття вимагає спеціалізованого обладнання та матеріалів, що може бути витратним. Витрати на форми, плавильні печі, обробку та контроль якості також можуть бути великими.

4. Обмеження щодо розмірів: Лиття може мати обмеження щодо максимального розміру деталі, особливо для великих компресорних крильчаток. Великі деталі можуть бути складними для лиття з одного куска, що може потребувати збирання з окремих частин.

5. Час виготовлення: Процес лиття може займати значний час, зокрема, пов'язаний з виготовленням форми, розплавленням матеріалу, охолодженням та обробкою деталі після лиття. Це може впливати на загальний час виробництва.

6. Вимоги до якості матеріалу: Лиття може вимагати спеціальних матеріалів з певними властивостями, що може обмежити вибір матеріалів для крильчаток.

Метод фрезерування:

1. Обмеження щодо складності геометрії: Фрезерування може бути обмежене в виготовленні складних геометричних форм або деталей зі складною внутрішньою структурою. Наприклад, виготовлення вузьких кутиків або маленьких отворів може бути викликом.

2. Витрати на обладнання: Фрезерування вимагає спеціалізованого обладнання, такого як верстати з чисельним програмним керуванням (ЧПК). Встановлення, підтримка та покупка обладнання можуть бути витратними.

3. Витрати на інструменти: Фрезерування вимагає використання різних інструментів, таких як фрези, які потребують обслуговування, заміни та точного налаштування. Це може призвести до додаткових витрат на інструменти та підтримку їх ефективності.

4. Час виробництва: Процес фрезерування може займати багато часу, особливо для великих або складних деталей. Залежно від складності проекту та обсягу роботи, може знадобитися багато часу на завершення фрезерування.

5. Витрати на програмування: Фрезерування вимагає попереднього програмування для визначення траєкторії руху інструменту. Це може бути часо- та трудомістким процесом, особливо для складних деталей або нових проектів.

6. Обмеження розмірів: Фрезерування може бути обмежене щодо розмірів деталі. Великі або важкі деталі можуть вимагати спеціального обладнання та підходів, що може бути витратним.

Метод листового штампування:

1. Обмеження щодо складності геометрії: Листове штампування може бути обмежене в виготовленні складних геометричних форм або деталей зі складною внутрішньою структурою. Наприклад, виготовлення деталей зі складними кривизнами або витяжками може бути складно.

2. Нерівномірність товщини матеріалу: Під час листового штампування можуть виникати проблеми з нерівномірністю товщини матеріалу, особливо на ребрах та краях деталей. Це може вплинути на якість та міцність крильчатки.

3. Необхідність великих сил: Листове штампування може вимагати великих сил, особливо для формування металу в складних геометричних

формах. Це може призводити до зношування та пошкодження штампів, а також вимагати потужнішого обладнання.

4. Обмеження щодо розмірів: Листове штампування може бути обмежене щодо розмірів деталі. Великі крильчатки з великою площею поверхні можуть бути складними для виготовлення штампуванням, особливо якщо потрібні висока точність та деталізація.

5. Витрати на штампи та обладнання: Штампи для листового штампування можуть бути витратними для виготовлення, підтримки та заміни. Крім того, витрати на спеціалізоване обладнання для штампування можуть бути значними.

6. Обмеження вибору матеріалів: Деякі матеріали можуть бути складні для листового штампування, особливо якщо вони мають низьку пластичність або схильність до тріщин.

Метод 3-D друкування:

1. Обмеження щодо матеріалів: Не всі матеріали підходять для 3D друкування. Деякі спеціальні матеріали або матеріали з високою температурою плавлення можуть бути важкодоступними або невідповідними для процесу друку.

2. Обмеження щодо міцності та міцності матеріалів: 3D друк використовує шарувату структуру, яка може призводити до зниження загальної міцності і міцності виробленої деталі порівняно з традиційними методами виробництва, такими як ковання або лиття.

3. Обмеження щодо розмірів та масштабу: 3D друк обмежений розмірами друкарського простору, що може бути недостатнім для виготовлення великих крильчаток або компресорів. Для великих деталей можуть знадобитися додаткові операції з об'єднання декількох частин, що може вплинути на їх точність і міцність.

4. Вимоги до підготовки моделі: Перед друкуванням потрібно створити 3D- модель деталі, а це може вимагати спеціалізованих навичок та програмного забезпечення. Також потрібно враховувати особливості друкарського простору та оптимізувати модель для досягнення бажаного результату.

5. Час друкування: 3D друк може бути часом затратним процесом, особливо для великих та складних деталей. Час, необхідний для завершення друку, залежить від розміру деталі, складності геометрії та швидкості друку.

6. Обробка та постобробка: Після друку деталі можуть вимагати додаткової обробки та постобробки, такої як шліфування, фінішування поверхні або обробка термічними методами. Це може вимагати додаткового часу та зусиль.

Метод гарячого штампування:

1. Обмеження щодо геометрії: Гаряче штампування може бути обмежене в виготовленні складних геометричних форм або деталей зі складною внутрішньою структурою. Наприклад, формування деталей зі складними кривизнами або витяжками може бути важким або неможливим.

2. Вимоги до обладнання: Гаряче штампування вимагає спеціального обладнання, такого як преси та нагрівальні печі, які можуть бути дорогими. Це може створювати високі витрати на виробництво та обслуговування обладнання.

3. Зміна властивостей матеріалу: Гаряче штампування зазвичай використовується для металевих матеріалів, і в процесі нагрівання і формування матеріал може зазнавати змін в своїх властивостях. Це може вплинути на механічні характеристики крильчатки, такі як міцність, твердість або стійкість до зношування.

4. Обмеження щодо розмірів та масштабу: Гаряче штампування може бути обмежене щодо розмірів деталі. Великі крильчатки з великою площиною

поверхні або складною геометрією можуть бути складними для виготовлення методом гарячого штампування.

5. Складність контролю якості: Гаряче штампування може вимагати складного контролю якості, особливо щодо геометричних параметрів, товщини стінок та міцності деталей. Виявлення дефектів або недоліків після формування може бути викликом.

Незважаючи на ці мінуси, гаряче штампування залишається широко використовуваним методом для виготовлення крильчаток центробіжних компресорів завдяки своїм перевагам, таким як висока продуктивність, висока точність формування та економічність. Виробники повинні враховувати ці мінуси та вживати заходів для оптимізації процесу та контролю якості.

1.4. Існуючі технології виготовлення деталей типу моноколесо (крильчатка). Огляд літературних джерел.

На сьогоднішній день виготовлення моноколесів переважно здійснюється шляхом механічної обробки під час поковки на п'ятикоординатних верстатах для високошвидкісного фрезерування з числовим програмним управлінням, таких як Liechti, Strarrag та інші. На підприємствах з високим технологічним рівнем, таких як АТ "Мотор Січ", ЗМКБ "Прогрес", "Салют" та інші, технологічний процес виготовлення таких деталей відзначається високою складністю і низьким коефіцієнтом використання металу. Застосування методів точного штампування може значно підвищити ефективність та економічність процесів виготовлення моноколесів.

Загальний досвід наукових шкіл США, Німеччини, країн СНД і досліджень, проведених за участю відомих науковців, таких як Богоявленський К. Н., Атрощенко А. П., Мещерін В. Т., Воробйов В. М. та інші, підтверджує, що основним недоліком статичних методів штампування є

можливість отримання заготовок моноколів з великими припусками за допомогою потужного пресового обладнання. Використання динамічних методів вимагає значних капіталовкладень і спеціалізованого обладнання, а також великих витрат на його експлуатацію. Крім того, відсутня теорія, яка б відображала реальний процес деформації в багатороз'ємних штампах, а також недостатньо даних про механічні, структурні і фізичні властивості металу заготовок.

Ізотермічне гаряче об'ємне штампування є перспективним методом отримання моноколів, який дозволяє досягти сприятливого формування текстури матеріалу в тілі диска і лопатки. Це забезпечує підвищений опір навантаженням, збільшує ресурс деталі, зменшує витрату матеріалу і трудомісткість виготовлення. Під час гарячого штампування моноколіси можна отримати деталі з робочими поверхнями (лопатками), які не потребують подальшої механічної обробки або мають мінімальні припуски для неї. Це дозволяє зберігати механічні властивості матеріалу, які виникають внаслідок його перебігу у порожнину ручая штампа [15-18], а також забезпечить значне підвищення вагових і експлуатаційних характеристик виробів при застосуванні штампованих моноколів в конструкціях ВМД.

Максимальна ефективність точного штампування досягається при виготовленні складних деталей з розвиненою поверхнею, що включають тонкі полотна, ребра, та складні аеродинамічні лопатки разом з диском. Цей процес забезпечує високу однорідність деформацій та рівномірну структуру матеріалу, що є важливим для забезпечення стабільних механічних властивостей та надійності виробів.

Ізотермічне штампування лопаток, дисків і моноколів (дисків з лопатками) веде до розвитку технологій з мінімальними або безприпускними параметрами. Це дозволяє значно скоротити витрати металу на 2,0-3,5 рази і мінімізувати механічну обробку, таку як різання та доводочні роботи.

Згідно з дослідженням [20], наразі в світі існує понад 10 тисяч різних технологічних процесів виготовлення лопаток. Проведення порівняльного аналізу цих альтернативних процесів ускладнене через різницю в економічних показниках виробництва на різних підприємствах, різноманітне обладнання та умови поставки матеріалів. Проте вважається, що найбільш ефективними альтернативними технологіями є ізотермічне штампування, штампування на гвинтових пресах та штампування на високошвидкісних молотах [21-26].

У дослідженнях [27-29] розглядаються технології та переваги виготовлення моноколів замість складальних лопаткових колів, що призводить до значного зменшення маси компресора, складності виготовлення та його собівартості. Обробка міжлопаточних каналів здійснюється шляхом різання на багатокоординатних фрезерних верстатах, таких як Turboblisk від компанії Liechti або Breton (див. рис. 1.6).

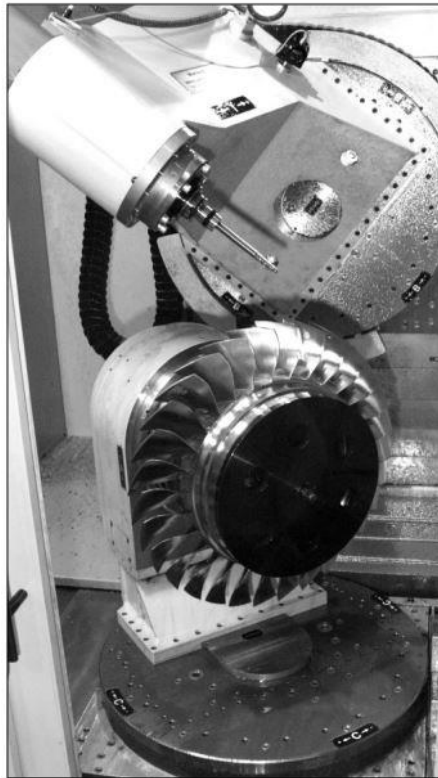


Рис.1.6. Виготовлення моноколеса на багатокоординатному фрезерному станку типу Turboblisk.

Зазвичай процес обробки виконується у два етапи, кожен з яких включає послідовне формування профілю, донишка та радіусів переходу. Однак обробка поверхні різання проточної частини пера стає викликом через конструкцію маложорстких тонкостінних лопаток, що мають велику консольність. Це вимагає спеціальних технологічних підходів та обробних засобів. Для поліпшення жорсткості пера та зменшення похибок обробки міжлопаточні канали заповнюються швидкотвердіючими сумішами, а також застосовуються спеціальні методи зняття матеріалу. Проте варто відзначити, що такі технології відрізняються великою складністю та високою вартістю виготовлення.

Автори досліджень [30-33] вказують на можливість значного підвищення техніко-економічної ефективності виготовлення моноколів шляхом передпресового формування міжлопаткових каналів при отриманні заготовки. Однак через технічні вимоги, пов'язані з виробництвом, такі методи майже відсутні або мають значні недоліки. У цьому контексті виникає інтерес до розгляду маршруту виготовлення лопаток, який включає такі основні етапи:

- передпресове видалення основного обсягу матеріалу із міжлопаткового простору в цілісній дисковій заготовці;
- вирівнювання припуску та досягнення необхідної точності за один-два кроки;
- доведення до заданої форми пера, донишка та радіусів переходу.

На рис. 1.7 показано двохперехідне гідроабразивне різання міжлопаточного каналу, що є одним із перспективних варіантів чорнової обробки міжлопаточних каналів.

Створення проточних поверхонь осьових моноколів та профільних поверхонь лопаток є одним з найбільш складних завдань в авіаційному виробництві сьогодення. Ця складність виникає від труднощів у формуванні геометрії цих деталей, високої вимоги до точності, складнощів у обробці

матеріалів, а також великого значення, яке приділяється якості несучих поверхонь для забезпечення максимальної надійності та довговічності ГТД. Згідно з дослідженнями [34-38], одним з перспективних методів утворення цих поверхонь є використання високошвидкісного фрезерування.

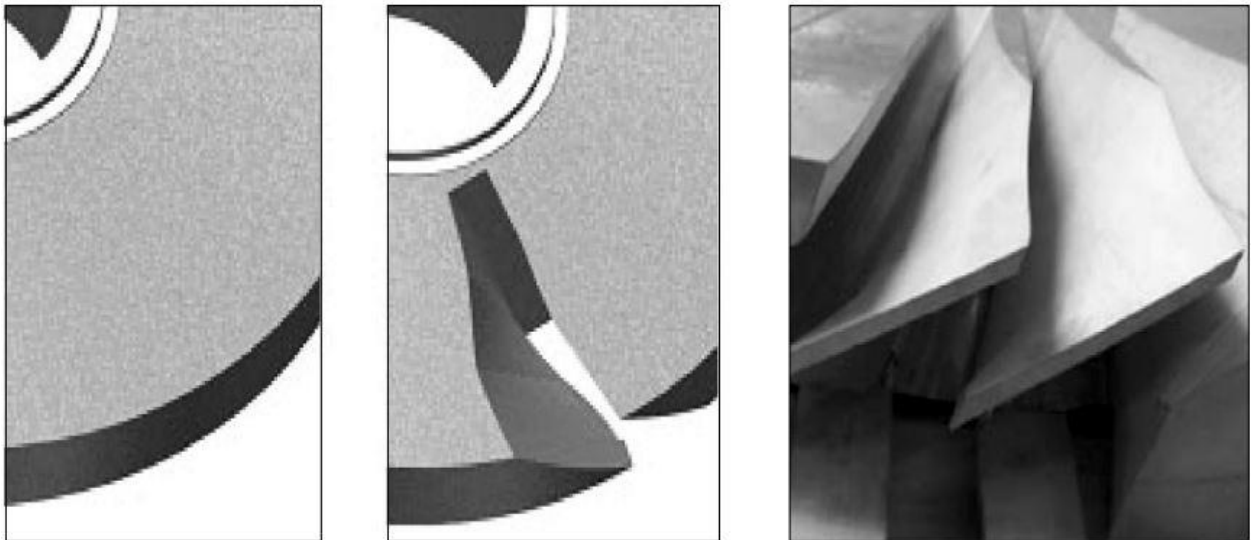


Рис.1.7. Двохперехідне гідроабразивне різання міжлопаточного каналу.

У дослідженні [39] автори описують промисловий досвід обробки лопаток моноколів ТГД, аналізують характеристики та переваги відомих методів обробки і роблять висновки щодо подальших напрямків досліджень. Вони відзначають, що одним з найбільш поширених методів чистової обробки при виробництві моноколів є електрохімічна обробка (ЕХО), яка полягає в розчиненні металу в електроліті за допомогою електричного струму. Використання ЕХО дозволяє отримувати лопатки з мінімальною товщиною та радіусами кромek приблизно 0,04 мм без подальшого ручного полірування (попередню обробку з видаленням великої кількості матеріалу в міжлопаточних каналах можна виконати або фрезеруванням, або гідроабразивним методом). Під час ЕХО, не маючи силового впливу на деталь, на її поверхневому шарі не утворюються додаткові напруження, що сприяє

підготовці поверхонь лопаток до наступних операцій зміцнення та/або покриття. Експериментальні дослідження виявили, що впровадження технології ЕХО для моноколесів супроводжується рядом проблем (див. рис. 1.8, рис. 1.9), таких як обмежений вибір електроліту (доступний лише обмежений перелік водних розчинів галоїдних та азотнокислих солей) та налаштування технологічних параметрів обробки (густина струму, температура електроліту, міжелектродний зазор, тощо).

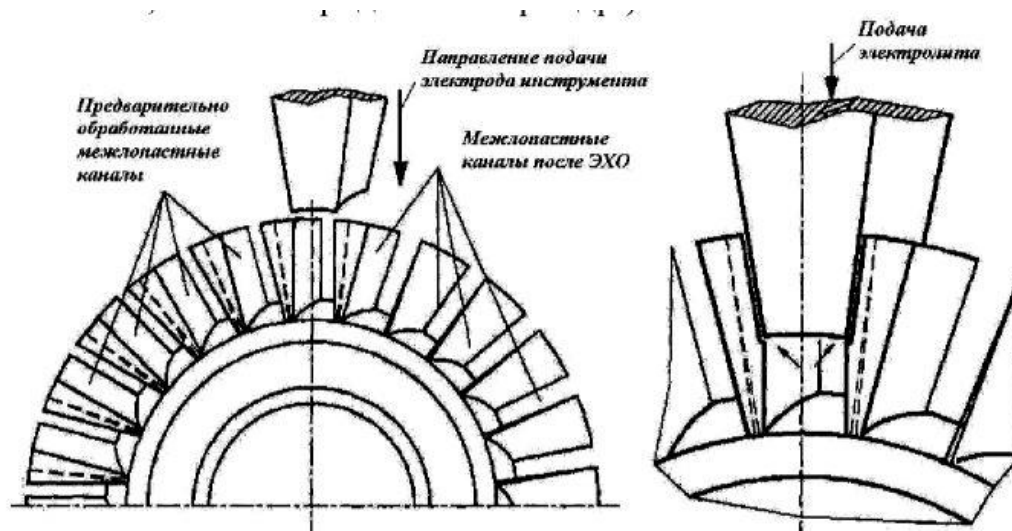


Рис.1.8. Схема формування методом ЕХО одним електродом міжлопаточного каналу моноколеса для одночасної обробки двох поверхонь.

Зі зростанням складності основних компонентів газотурбінних двигунів, таких як використання поверхонь подвійної кривизни, ажурних тонкостінних та пустотілих елементів, зростають вимоги до якості та точності виготовлених деталей.

Під час обробки таких елементів все частіше застосовуються фізико-хімічні методи, зокрема електроерозійна обробка (ЕЕО), через наступні причини: сучасні конструкційні матеріали для жаростійких деталей наближаються до властивостей інструментальних матеріалів, а зносостійкість

ріжучого інструменту, який обробляє такі деталі, обмежена; ЕЕО дозволяє отримувати елементи конструкцій газотурбінних двигунів, які складно або неможливо виготовити іншими методами, наприклад, перфоровані деталі.

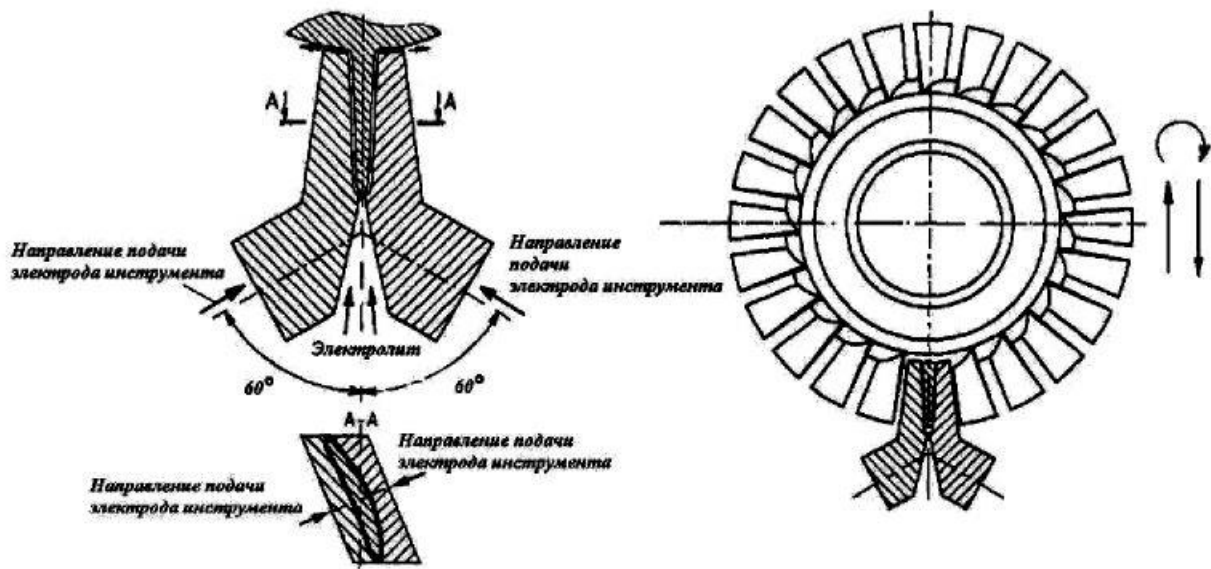


Рис.1.9. Схема формування методом ЕХО із використанням двох електродів лопатки моноколеса для одночасної обробки однієї лопатки.

В теперішній час сучасний стан та технічний рівень ЕЕО дозволяють ставити та ефективно вирішувати широкий круг технологічних задач, до яких належать виготовлення методом електроерозії моноколес із малими міжлопаточними каналами (рис. 1.10, рис. 1.11).

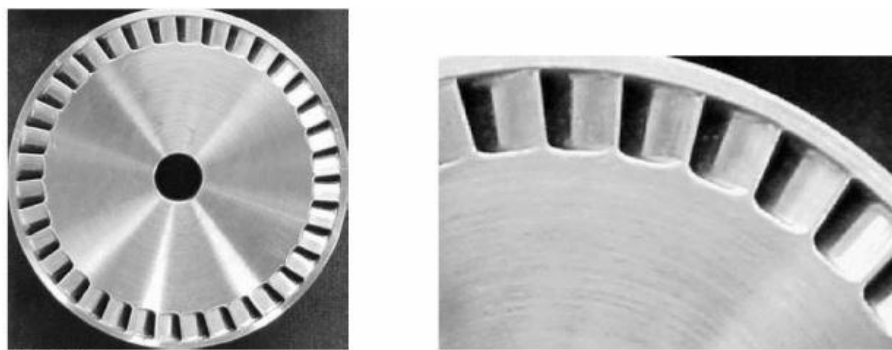


Рис.1.5. Моноколесо із міжлопаточними каналами, отриманими методом ЕЕО.

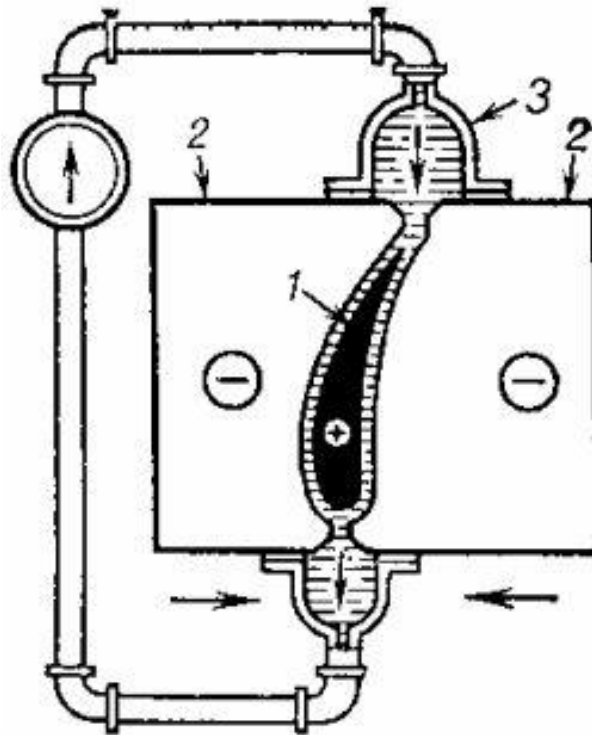


Рис.1.11. Схема процесу обробки лопатки газотурбінного двигуна методом ЕЕО:

1 – лопатка ГТД; 2 – електроди; 3 – електроліт

Серед головних переваг цього методу обробки можна виділити наступне:

- Можливість обробки будь-яких матеріалів, що провідні струмом, незалежно від їх фізико-хімічних властивостей, твердості, в'язкості та крихкості.
- Можливість одночасної обробки всієї складної поверхні заготовки з мінімальним різом, завдяки простому поступовому переміщенню електрода-інструмента з необхідним профілем поверхні.
- Відсутність потреби в використанні ріжучого інструменту або абразиву з вищими механічними характеристиками, ніж у матеріалів, які обробляються.

- Можливість обробки глибоких отворів та щілин, включаючи ті, що мають змінний переріз по осі.
 - Можливість одночасного обслуговування кількох станків одним оператором, оскільки електроерозійні станки зазвичай є напівавтоматичними або автоматичними.
 - Відсутність силової дії інструмента на заготовку, що дозволяє обробляти поверхні нежорстких та тонкостінних деталей.
 - Можливість автоматизації процесу.
- Одночасно з перевагами, виявлені недоліки методу ЕЕО:
- Низька продуктивність обробки на чистових режимах, що призводить до великого споживання електроенергії.
 - Ускладнення конструкції та обслуговування станка.
 - Потреба у використанні робочої рідини з високими діелектричними властивостями.

Точність обробки та чистота поверхні, що піддається ЕЕО, залежать від різних факторів, які не завжди можна повністю врахувати. Електрод-інструмент зазнає значного зношення під час процесу обробки, і наразі ще не розроблено аналітичних залежностей, які б ураховували всю різноманітність факторів для розрахунку розмірів при ЕЕО.

У світовій практиці виготовлення моноколів традиційно проводиться методом фрезерування блісків та блінгів, який може бути застосований на всіх етапах виробництва, включаючи чорнову, напівчистову та чистову обробку, з використанням багатокоординатних фрезерних верстатів з ЧПУ.

Така технологія включає кілька етапів, таких як чорнова вибірка міжлопаточного простору, напівчистова обробка ступиці та чистова обробка радіуса сполучення ступиці та пера лопатки. Проте для виготовлення з високоміцних сталей та нікелевих сплавів цей метод є менш ефективним через їх низьку оброблюваність. Крім того, фрезерування не забезпечує отримання

дуже тонких та довгих лопаток через виникнення віджиму лопатки під час різання, що може призвести до зниження якості та точності обробки.

Для вирішення цих питань, більшість експертів рекомендує:

- створення 3D математичної моделі виробу (моноколеса з лопатками);
- розробку керуючої програми для обробки;
- візуалізацію обробки та перевірку програми на помилки (рис. 1.12);
- використання багатокоординатних фрезерних центрів для обробки;
- контроль профілю лопатки та ступиці на вимірювальних машинах;
- полірування поверхні.

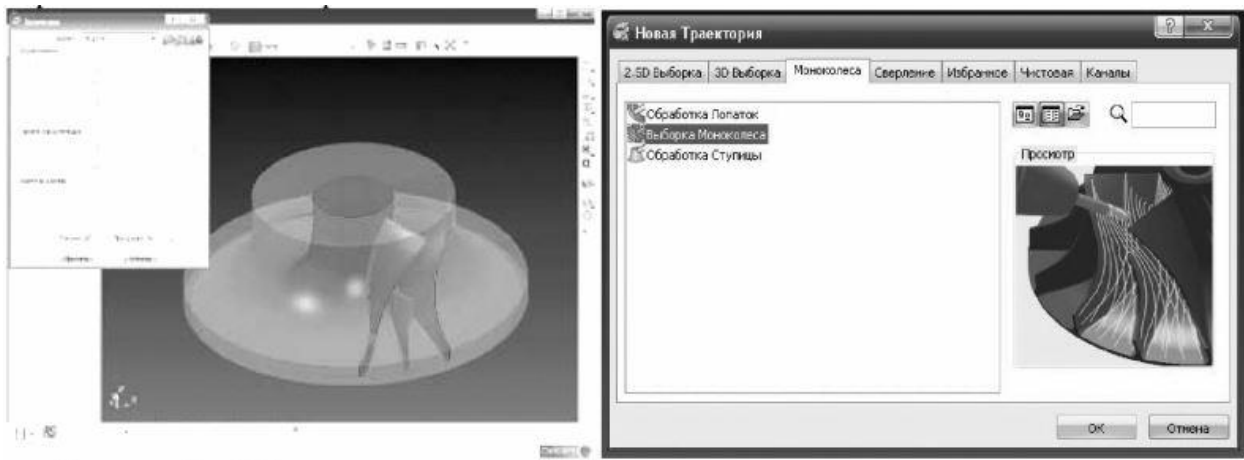


Рис.1.12. Математична 3D-модель моноколеса та візуалізація обробки.

Слід зауважити, що ці рекомендації вже широко відомі та застосовуються на провідних авіадвигунобудівних підприємствах. Однак, забезпечення необхідної якості та підвищення точності обробки залишається однією з найактуальніших проблем сучасного машинобудування.

На думку авторів, вирішення цієї проблеми вимагає нового підходу, який полягає у визначенні динамічних факторів, що впливають на якість та точність обробки, і розробці рекомендацій щодо усунення негативного впливу домінуючого фактора. Це завдання неможливе без дослідження процесу фрезерування, зокрема його специфіки при обробці моноколів, за допомогою математичного моделювання.

Автори працюють над створенням узагальненої математичної моделі процесу фрезерування, яка включає модель формоутворення з урахуванням пружних віджимів технологічної системи та модель її динамічної стійкості. Ця модель дозволить прогнозувати та управляти якістю та точністю обробки.

У роботах [40-43] автори досліджують технологію обробки моноколів за допомогою високошвидкісного фрезерування. Вони аналізують новітні технології, активно впроваджувані на підприємстві «Мотор Січ», для обробки осевих моноколів (рис. 1.13) із використанням високошвидкісного фрезерування. Особливу увагу приділено інструментальній підготовці виробництва. Розглянуті програмні середовища для підготовки та контролю керуючих програм для 5-координатних верстатів при високошвидкісному фрезеруванні лопаток моноколів. Також описані концепції DNC-мережі, впроваджені на підприємстві. На основі проведених досліджень і отриманих результатів автори роблять висновок, що вибраний напрямок з урахуванням тенденцій розвитку обробки складнопрофільних деталей ГТД високошвидкісним фрезеруванням є перспективним і потребує подальшого розвитку.

У патенті авторів [44] запропоновано метод виготовлення інтегрального бліска з неохолоджувальними робочими лопатками для ГТД, в якому окремі лопатки, виконані з одного металевих сплаву, з'єднуються з дисковою частиною, виготовленою з іншого металевих сплаву. Відмінністю цього методу є те, що окремі лопатки з'єднуються з дисковою частиною в єдину

деталь за допомогою гарячого ізостатичного пресування (ГІП) в зоні, приблизно рівній тривалій міцності цих сплавів. При цьому профільна частина, трактова полиця та частина ніжки вище вказаної зони залишаються поза зоною дії ГІП, а інша частина ніжки та дискова частина капсулюються і розміщуються в зоні впливу. Ніжки лопаток з'єднуються з диском, переважно встик, а область зони, приблизно рівній тривалій міцності обох сплавів, визначається попередньо, наприклад, за кривими тривалої міцності Ларсона-Міллера.



Рис.1.13. Осьове моноколесо, яке виготовлене високошвидкісним фрезеруванням.

Цей метод відрізняється від відомих тим, що робочі лопатки відливають з чотирьохкутними в поперечному перерізі ніжками, які подовжені до зони, що відповідає тривалій міцності обох з'єднувальних сплавів. Під час з'єднання лопатки вставляють подовженими частинами ніжок в отвори технологічного кільця, припаюють до нього, шліфують по внутрішньому діаметру, а заготовку

диска шліфують і обробляють по зовнішньому діаметру поверхні. Отримане технологічне кільце з лопатками встановлюють на оброблену зовнішню поверхню диска з натягом, капсулюють приварюванням торцевих кришок до технологічного кільця. Капсула навколо диска і ніжок лопаток формується таким чином, щоб зона приблизно рівної тривалої міцності обох сплавів була розташована всередині капсули. Капсулу розміщують у газостаті таким чином, щоб у зоні дії технологічного процесу перебувала тільки капсула з вмістом. Потім проводять процес гарячого ізостатичного пресування (ГІП), після чого видаляють елементи капсули і технологічне кільце механічною обробкою та витравлюванням, формують радіуси на диску в місцях з'єднання з лопатками, наприклад, електрохімічним способом, та здійснюють кінцеву механічну та фінішну термообробку.

Останнім часом в авіадвигунобудуванні активно використовуються конструкції компресорних коліс з широкохордними лопатками. Таке колесо може замінити кілька ступенів компресора традиційної конструкції. Виготовлення компресорного колеса за схемою "диск разом із лопатками" включає механічну обробку: проточку диску, свердління навколо лопаток, видалення металу з міжлопаточного простору та чистову обробку лопаток.

Автори роботи [45] досліджують та розробляють процеси виготовлення суцільноштампованих робочих коліс вентиляторів газотурбінних двигунів з широкохордними лопатками. Метою їх дослідження є визначення можливостей виготовлення за схемою "диск разом із лопатками" суцільноштампованих точних заготовок, з готовими функціональними поверхнями, які не потребують додаткової ручної доводки. У роботі представлені результати розробки та досліджень технологічного процесу штампування точної заготовки робочого колеса вентилятора авіаційного газотурбінного двигуна ДВ2 з алюмінієвого сплаву середньої міцності, а також конструкція нового багатороз'ємного розбірного штампу.

На рис. 1.14 показано штамп для виготовлення суцільноштампованих робочих моноколів турбомашин із лопатками складного аеродинамічного профілю.

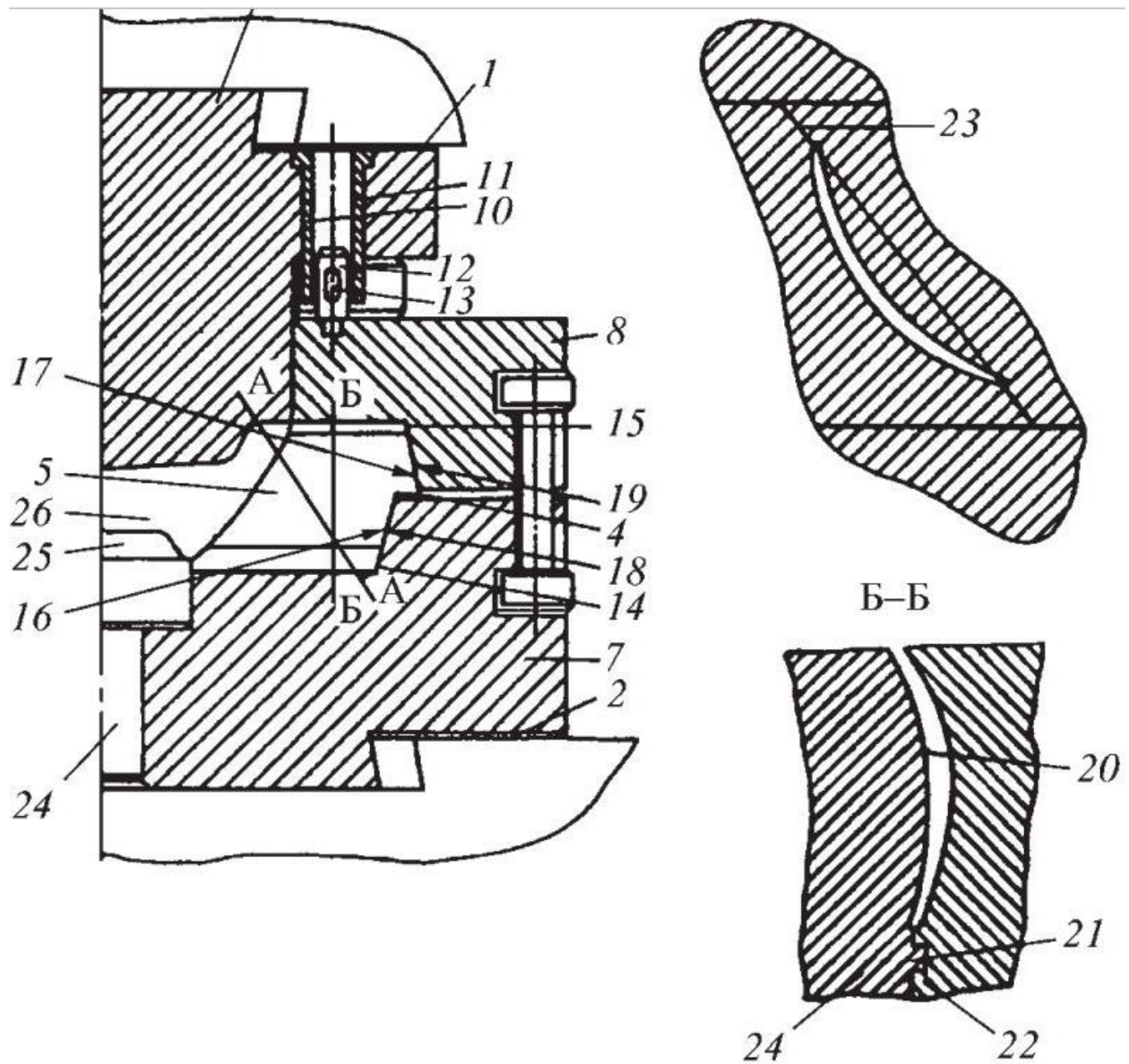


Рис.1.14. Багаторознімний розбірний штамп.

Штамп складається з рухомої верхньої частини 1 і нерухомої нижньої частини 2, в яких розміщені відповідно пуансон 3 і матриця 4, яка складається з зібраних секторних закладних елементів 5 конструкції 6 (рис. 1.15). Ця

конструкція розташована між опорною плитою 7 та притисочною плитою 8 нижньої частини штамп. Формування нерознімних із диском лопаток колеса здійснюється в порожнинах 9, передбачених між суміжними закладними елементами 5.

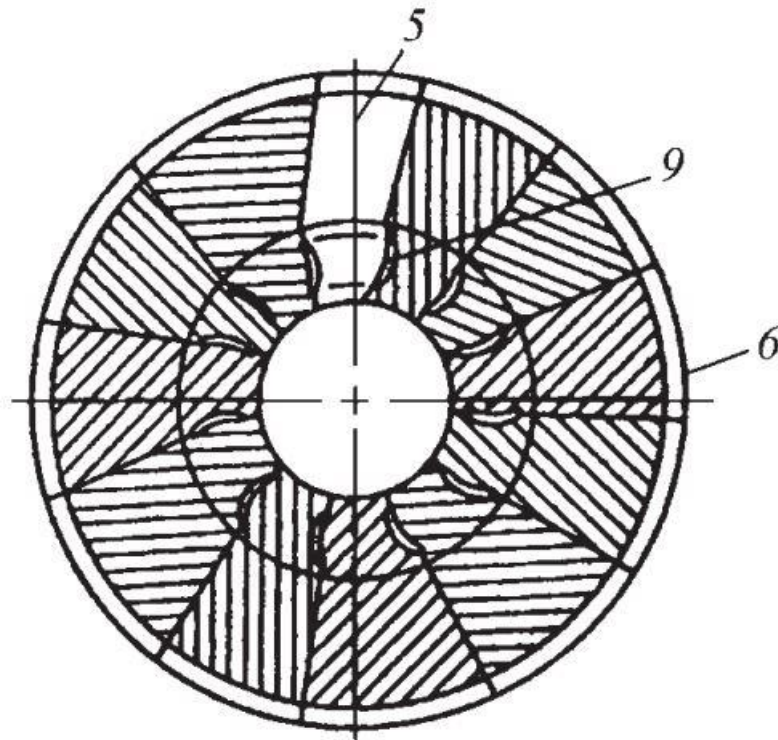


Рис.1.15. Секторна матриця штамп.

Рухома верхня частина 1, окрім пуансона 3 зі сферичною головкою, включає механізм післяопераційного роз'єму плит 7 та 8. Цей механізм складається з вмонтованого в плиту пуансонотримача 10, направляючих втулок 11, які взаємодіють із штангами 12, оснащеними замками-засувками 13. В опорній плиті 7 та притискній плиті 8 розташовані чашоподібні вибірки 14 та 15, що мають зустрічні конічні стінки 16 та 17, які в свою чергу взаємодіють із зустрічними конічними профільними поверхнями 18 та 19 закладних елементів 5.

Закладні елементи встановлені консольно та зафіксовані між собою за допомогою призматичних повздовжніх виступів 21 та відповідних впадин 22, розташованих на пов'язаних бокових стінках 20, з гарантованим зазором 23 шириною 0,01-0,2 мм для запобігання затіканню деформованого металу заготовки.

Власна частота коливань консолей закладних елементів 5 дорівнює або пропорційна швидкості течії металу заготовки під час формозміни лопаток, що може спричиняти вібрацію стінок закладних елементів 5 через самозбудження при заповненні металом порожнини 9. Штамп також оснащений виштовхувачем 24 із профільним виступом 25.

Заготовки надають чашоподібну форму та нагрівають її. Потім пакет секторних закладних елементів 5 (рис. 1.17) за допомогою спеціального монтажного пристосування (рис. 1.16) встановлюють у чашеподібну вибірку 14 опорної плити 7, яка є нижньою частиною контейнера, і розміщують у ній нагріту чашеподібну заготовку 26.

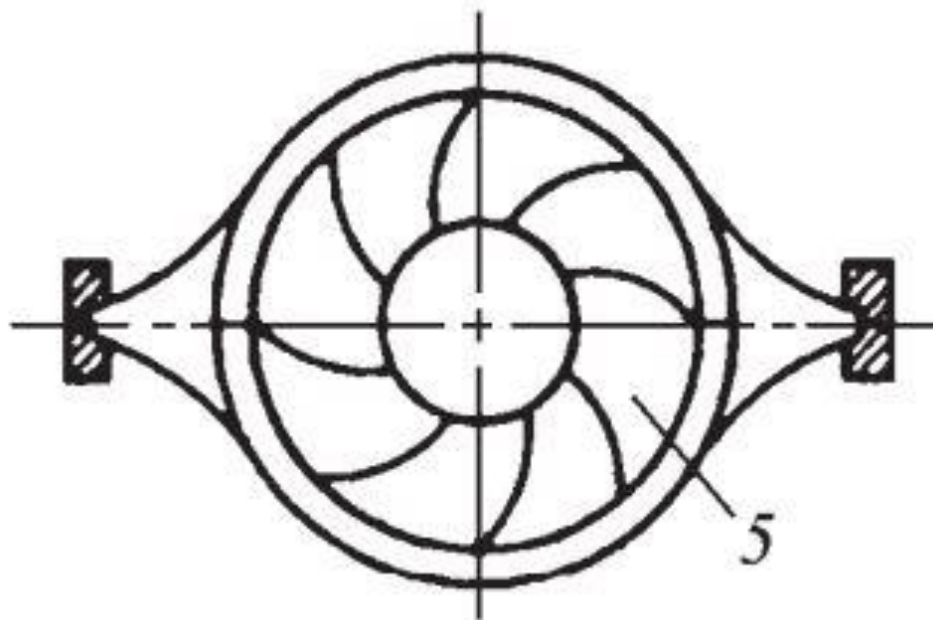


Рис.1.16. Пристосування для монтажу та демонтажу матриці.

За допомогою пуансонотримача 10 опускають притискну плиту 8, яка має зафіксовані на ній замки-засувки 13. Під час цього процесу заготовка опирається боковими стінками на закладні елементи 5, а дном - на профільний виступ виштовхувача 25. Сверху вона притиснута профільною головкою пуансона 3, що щільно входить у верхню впадину заготовки. Після цього опорну плиту 7 твердо з'єднують з притискною плитою 8, і штамп готовий до використання.

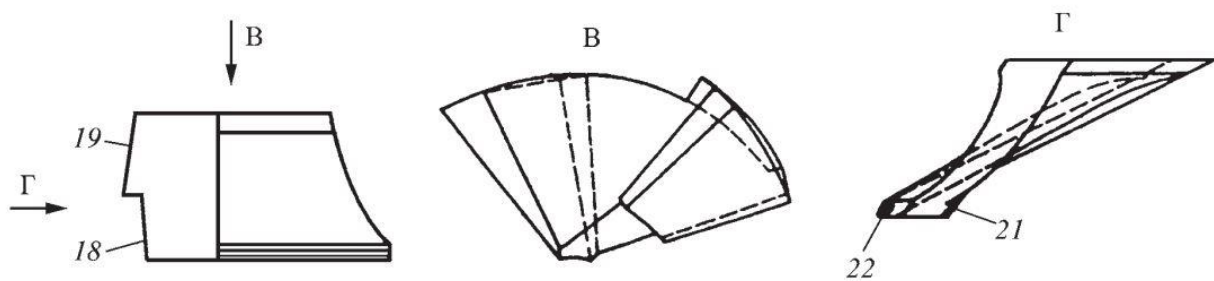


Рис.1.17. Закладний елемент матриці.

Пуансон 3, переміщуючись вниз через пуансонотримач, застосовує потрібну силу, щоб видавити метал заготовки між матричною та пуансонною частинами штампа у радіальному напрямку. Формозміна проводиться без додаткового підігрівання металу, а видавлювання керується шляхом регулювання швидкості його течії, для чого емпірично розраховується графік роботи пресу.

Після наповнення порожнин закладних елементів та формозміни лопаток притискну плиту 8 піднімають, від'єднуючи її від опорної плити 7. Закладні елементи та штамповка піднімаються вгору виштовхувачем 24 та спеціальним пристосуванням, яке раніше використовувалося для монтажу пакету закладних елементів 5. Потім штамп повертають на 90 градусів і фіксують у цьому положенні за допомогою спеціальних упорів, щоб уникнути його перекидання.

Наступно демонтують закладні елементи, вивільняючи від них відштамповані вироби (рис. 1.18).



Рис.1.18. Штамповане колесо із широкохордними лопатками.

1.5. Особливості гарячого ізотермічного формоутворення моноколів.

Ізотермічне гаряче об'ємне штампування вважається перспективним методом для виготовлення моноколів. Цей процес дозволяє отримувати належну текстуру матеріалу у тілі диска та лопатки, що підвищує їх опір до навантажень та продовжує ресурс використання. Крім того, він сприяє зменшенню витрат матеріалу та складності виробництва.

Під час гарячого штампування моноколів можна отримати деталі з робочими поверхнями (наприклад, пера лопаток), які не потребують додаткової механічної обробки або мають мінімальні припуски та напуски для наступної обробки. Це дозволяє зберегти механічні властивості матеріалу, що утворюється під час течії його в порожнину ручного штампування. Використання таких штампованих моноколів у конструкціях газотурбінних двигунів гарантує значне підвищення експлуатаційних та вагових характеристик виробів. Найбільша ефективність точного штампування може бути досягнута при виготовленні складних деталей з розвинутою поверхнею, які включають тонкі полотна, ребра, а також лопатки складного аеродинамічного профілю, що з'єднуються з диском [46-49].

Процеси штампування забезпечують високу рівномірність деформацій та формування однорідної структури матеріалу з потрібною дисперсністю. Це призводить до підвищення стабільності механічних властивостей та надійності виготовлених виробів. Ізотермічне штампування лопаток, дисків та моноколів дисків із лопатками дозволяє розробити технологію без припуску або з мінімальним припуском. Це призводить до значного зменшення витрат металу в 2-3,5 рази і мінімізації обсягу механічної обробки, включаючи різання та слюсарно-доводочні роботи.

В дослідженні авторів [50] розглянуто деякі особливості процесу гарячого ізотермічного штампування точних деталей з тонкостінними елементами. Основною метою роботи є встановлення специфічних аспектів реалізації цього процесу на прикладі моноколісу шляхом узагальнення типових конструкторсько-технологічних схем та аналізу результатів чисельних розрахунків. Застосовуючи програмне забезпечення CAD/CAE Deform-3D, в роботі були визначені силові параметри формування та напружено-деформований стан матеріалу АК4-1 в рамках в'язкопластичної моделі. Виявлено, що найбільш інтенсивні деформації та напруження спостерігаються в зонах переходу від диска до лопаток. У зоні формування пера лопаток середні напруження стискаючого характеру, досягаючи максимальних значень при температурі 420 °С та швидкості деформації 1 мм/с. Дослідження підкреслює важливість управління формою початкової заготовки для оптимізації використання ресурсу пластичності, особливо у критичних зонах. Зменшення швидкості деформації може суттєво полегшити процес та забезпечити стійке заповнення тонкостінних елементів. Дослідження підтверджує переваги ізотермічного штампування при малих швидкостях деформації, включаючи короточасну повзучість або надпластичність, а також формування в твердо-рідкому стані.

1.6. Висновки до розділу 1 та постановка задачі досліджень.

В даному розділі 1 було виконано наступне: проведено літературно-патентний огляд джерел процесів гарячого ізотермічного формоутворення деталей моноколів, розглянуті різні конструкції моноколів авіаційних двигунів, наведені існуючі технології виготовлення моноколів та вказані особливості ізотермічного штампування моноколів при гарячій пластичній деформації.

На основі цього, були встановлені наступні задачі дослідження:

1. Виконати конструкторсько-технологічний аналіз деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами та розробити технологію її виготовлення методами гарячого штампування.
2. Провести розрахунок комп'ютерними чисельними методами гарячого ізотермічного формоутворення деталі моноколеса типу крильчатка із алюмінієвого сплаву В95 та проаналізувати отримані результати.
3. За результатами проведеного конструкторсько-технологічного аналізу та комп'ютерного моделювання процесу ізотермічного штампування моноколеса типу крильчатка спроектувати штампове оснащення.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЇЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ДЕТАЛІ «КРИЛЬЧАТКА»

2.1. Конструкторсько-технологічний аналіз деталі «Крильчатка».

Як видно з наведених даних, для виготовлення моноколів використовуються пароповітряні та високошвидкісні молоти, або гідравлічні преси з великим зусиллям. Використання обладнання, яке здатне розвивати значні зусилля при штампуванні таких деталей, пояснюється тим, що в більшості випадків використовується точне штампування деталей. Необхідно забезпечити якісне заповнення штампового ручая, особливо в місцях функціональних частин моноколів, таких як пера лопаток.

Також великий клас моноколів, особливо моноколеса класу – крильчатка радіальна має малу відносну товщину диска, яка визначається за формулою:

$$s_{\text{відн}} = \frac{h}{D}$$

де h – товщина диска моноколеса;

D – діаметр диска моноколеса.

Разом із цим моноколеса такого типу мають велике відношення висоти пера лопатки до товщини диска $k = \frac{h_{\text{п}}}{h}$.

Особливості геометрії моноколісу ускладнюють течію металу в порожнину штампувального ручая, особливо у зоні пера лопатки. Щоб забезпечити повне заповнення ручая штамп, потрібно використовувати молоти та гідравлічні преси з великим зусиллям. У випадку точного штампування моноколісу типу "крильчатка радіальна" форма ручая, форма заготовки та її розташування в штампувальному ручаї, а також швидкість деформування відіграють ключову роль у величині технологічного зусилля.

На рис. 2.1 показано деталь – моноколесо «Крильчатка радіальна», яка є деталлю складної конфігурації.

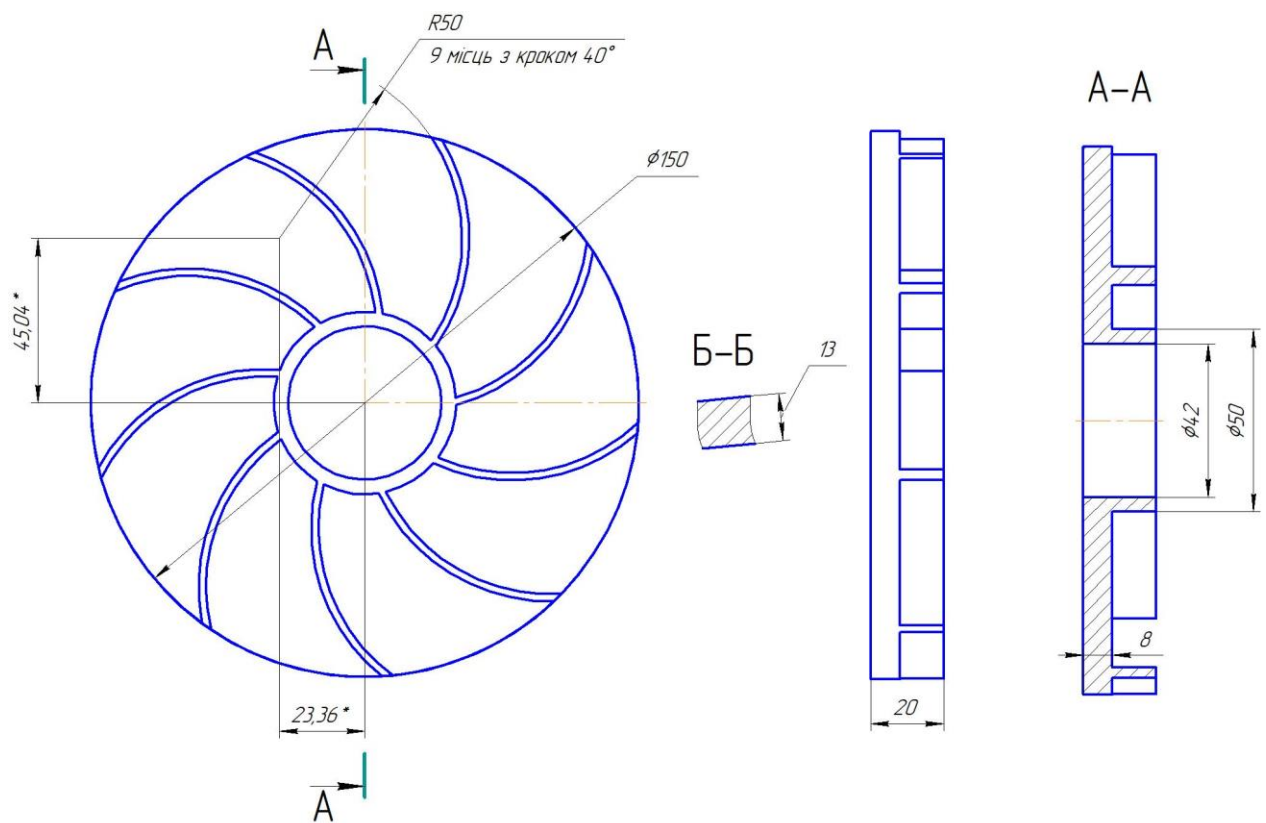


Рис.2.1. Креслення моноколеса «Крильчатка радіальна».

На рис. 2.2 показано 3D-модель деталі.

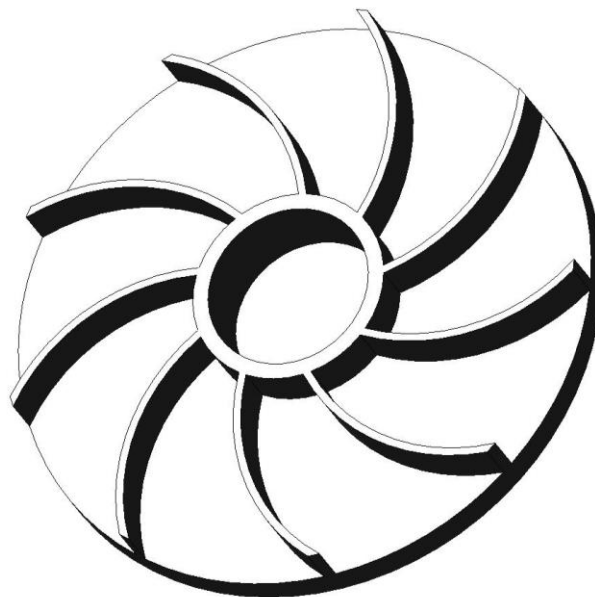


Рис.2.2. 3D модель деталі «Крильчатка».

Відносна товщина диска моноколеса «Крильчатка радіальна» становить $s_{\text{відн}} = \frac{8}{150} = 0,05$, а відношення висоти пера лопатки до товщини диска – $k = \frac{12}{8} = 1,5$.

2.2. Розробка технології виготовлення деталі моноколеса типу крильчатка радіальна.

Ефективність втілення конструктивних рішень переважно залежить від технологічного підходу. Розробка технологічного процесу має сприяти підвищенню продуктивності та якості виготовлених виробів, одночасно зменшуючи витрати праці на їхнє виготовлення. У зв'язку з цим виготовлення втулки моноколеса типу "крильчатка радіальна" зазвичай виконується за допомогою методу ізотермічного штампування.

Таким чином на основі держстандарту, за кресленням деталі (рис. 2.1) та її 3D моделлю (рис. 2.3) було виконано 3D модель викову (рис. 2.3) із аксіальними тонкостінними елементами «Крильчатка радіальна» із врахуванням припусків та напусків, які в подальшому будуть зніматися механічною обробкою.

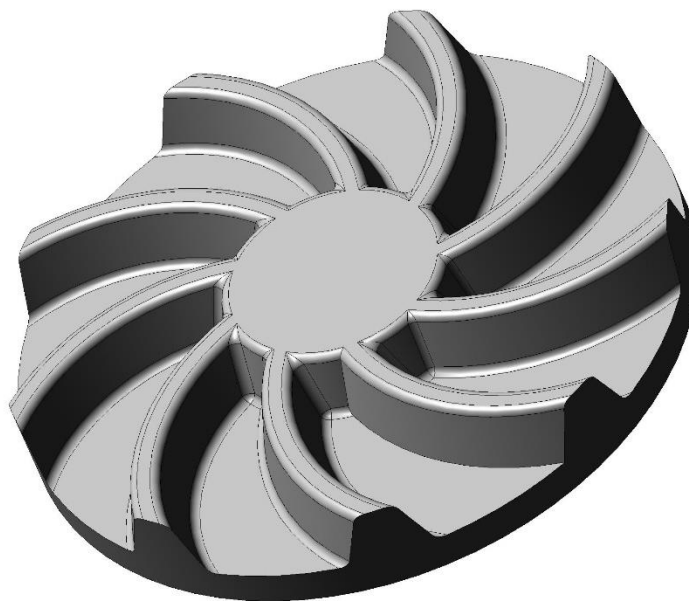


Рис.2.3. 3D модель викову.

Матеріал деталі «Крильчатка» – алюмінієвий сплав В95.

Хімічний склад сплаву В95 наведено на рис. 2.4.

Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примесей
до 0.5	до 0.5	0.2 - 0.6	до 0.1	0.1 - 0.25	до 0.05	86.3 - 91.5	1.4 - 2	1.8 - 2.8	5 - 7	прочие, каждая 0.05; всего 0.1

Рис.2.4. Хімічний склад алюмінієвого сплаву В95.

За об'ємом вихідної деталі «Крильчатка» (рис. 2.5) знайдемо розміри вихідної заготовки.

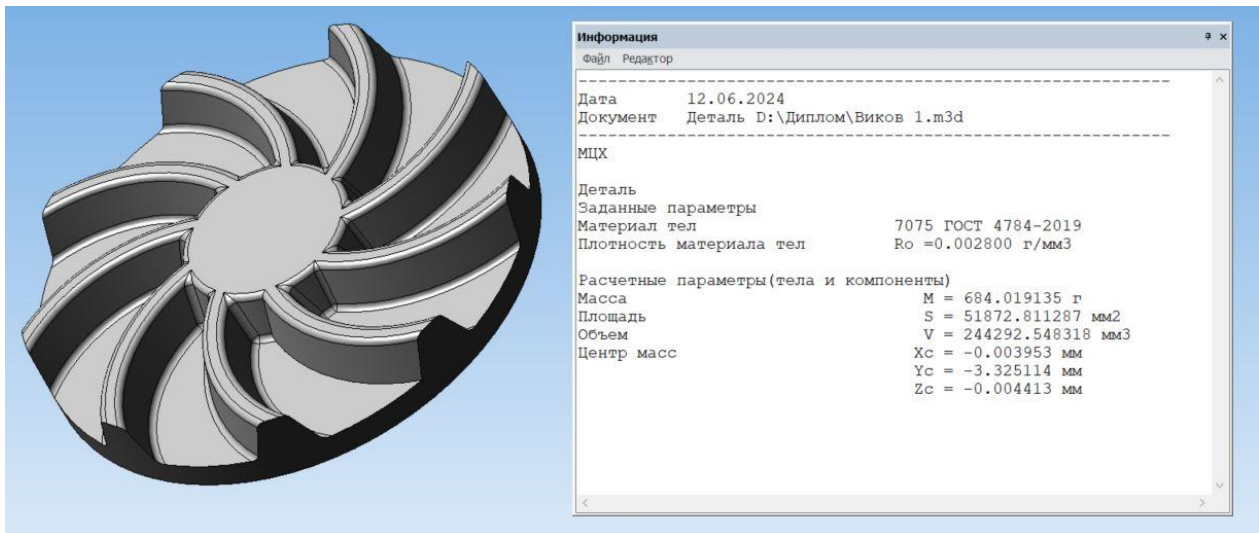


Рис.2.5. Об'єм вихідної деталі «Крильчатка».

Приймаємо діаметр заготовки $D_{\text{заг}} = \varnothing 150$ мм.

Об'єм вихідної (рис. 2.5):

$$V_{\text{вик}} = 244293 \text{ мм}^3$$

Об'єм заготовки буде:

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{вик}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{заг}}^2}{4} \cdot H_{\text{заг}} = 244293 \text{ мм}^3$$

Тоді висота заготовки буде:

$$H_{\text{заг}} = \frac{4 \cdot V_{\text{заг}}}{\pi \cdot D_{\text{заг}}^2} = \frac{4 \cdot 244293}{\pi \cdot 150^2} = 14 \text{ мм}$$

Ескіз плоскої круглої заготовки для штампування моноколеса показано на рис. 2.6.

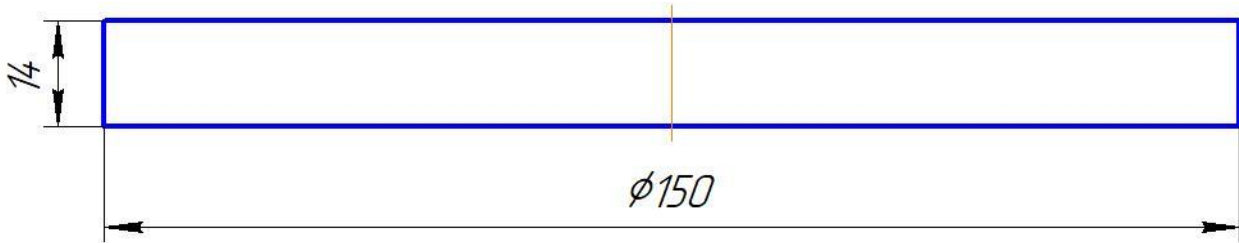


Рис.2.6. Кругла заготовка для ізотермічного штампування деталі «Крильчатка».

Отже, деталь «Крильчатка» має наступну технологію виготовлення:

1. Отримання вихідних заготовок.
2. Ізотермічне штампування викову.
3. Механічна обробка.

2.3. Висновки по розділу.

В даному розділі виконано конструкторсько-технологічний аналіз деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами та розроблено технологію її виготовлення. Встановлений матеріал деталі для проведення чисельного розрахунку МСЕ – алюмінієвий сплав В95.

Таким чином, після даного розділу поставлені наступні задачі:

1. Провести розрахунок чисельними методами гарячого ізотермічного формоутворення деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами із алюмінієвого сплаву В95 та проаналізувати отримані результати.

2. За результатами проведеного конструкторсько-технологічного аналізу та розрахунку чисельними методами процесу ізотермічного штампування деталі із аксіальними тонкостінними елементами спроектувати штампове оснащення.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ЧИСЕЛЬНИМИ МЕТОДАМИ ГАРЯЧОГО ІЗОТЕРМІЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛІ КРИЛЬЧАТКА ІЗ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ В95 ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ DEFORM

3.1. Розрахункова схема процесу гарячого ізотермічного штампування при моделюванні методом скінченних елементів (МСЕ) та задані граничні умови.

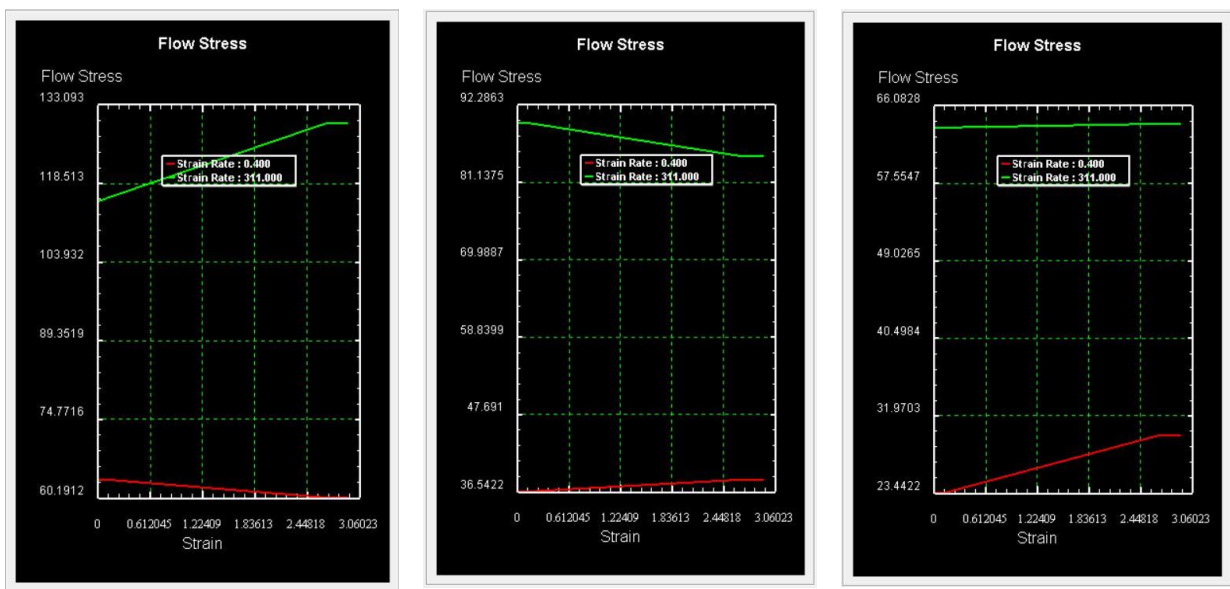
В даному розділі метою є оцінка енергосилових параметрів та напружено-деформованого стану (НДС) при формоутворенні гарячим ізотермічним штампуванням деталі «Крильчатка» з аксіальними тонкостінними елементами із алюмінієвого сплаву В95.

Для оцінки даних параметрів було проведено комп'ютерне чисельне моделювання процесу ізотермічного штампування деталі «Крильчатка» із використанням програмного середовища DEFORM, а саме його модуля DEFORM-3D, за допомогою якого можна відслідковувати переміщення заготовки (її матеріальних частинок) при заповненні порожнини ручая штампу.

В даному випадку деталь «Крильчатка» виготовляється із алюмінієвого сплаву В95, хімічний склад якого приведено в розділі 2 на рис. 2.3.

При комп'ютерному моделюванні процесу ізотермічного формоутворення деталі із тонкостінними елементами в програмному комплексі DEFORM використовували зарубіжний аналог алюмінієвого сплаву В95, що присутній в програмі – сплав 7075.

На рис. 3.1 показані діаграми істинних напружень $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_i, \bar{\varepsilon}, T)$ для алюмінієвого сплаву 7075 із програми DEFORM при температурах 400° С, 450° С та 500° С.



а)

б)

в)

Рис.3.1. Діаграми істинних напружень із програмного комплексу DEFORM для алюмінієвого сплаву 7075:

а – при температурі 400° С, б – при температурі 450° С, в – при температурі 500° С

На рис. 3.2 покажемо розрахункову схему процесу ізотермічного штампування деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами із програмного середовища DEFORM на початку (а) та в кінці процесу (б).

Як бачимо зі схеми рис. 3.2а, кругла заготовка 1 вкладається в штамповий ручай в матрицю 2. При робочому ході за допомогою пуансону 3 відбувається ізотермічне штампування деталі «Крильчатка» 4 із тонкостінними аксіальними елементами.

Для моделювання процесу ізотермічного штампування крильчатки із аксіальними тонкостінними елементами із алюмінієвого сплаву 7075 (аналог В95) використовуємо плоску круглу заготовку товщиною 14 мм та діаметром 150 мм.

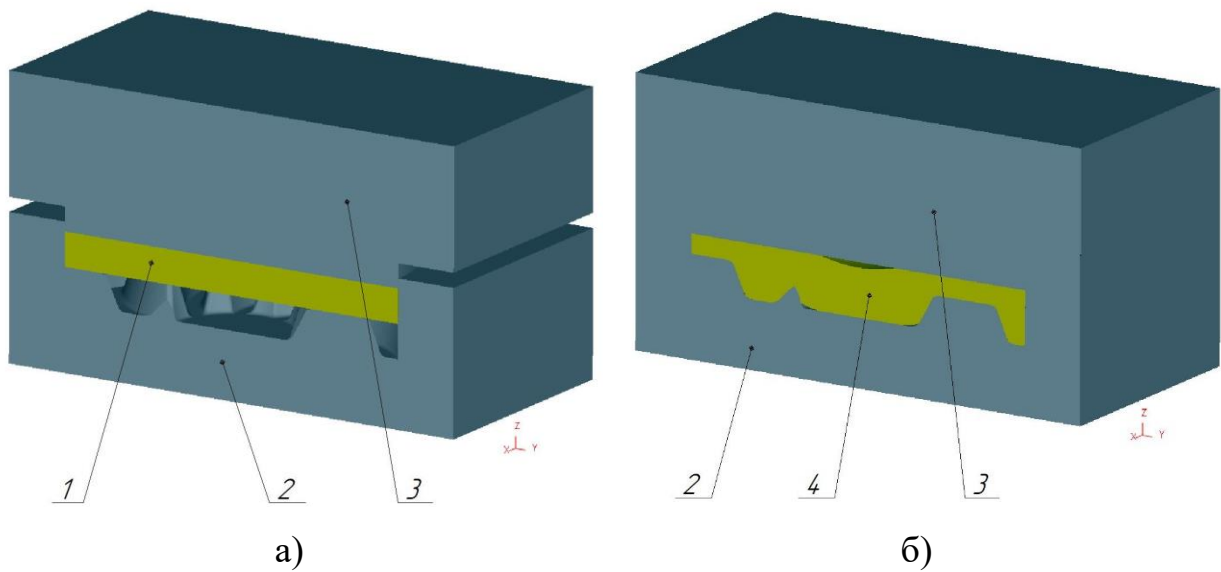


Рис.3.2. Розрахункова схема процесу ізотермічного формоутворення крильчатки із аксіальними тонкостінними елементами із програми DEFORM:

а – на початку процесу штампування, б – в кінці процесу штампування

Модель плоскої круглої заготовки з розмірами із програми DEFORM показано на рис. 3.3.

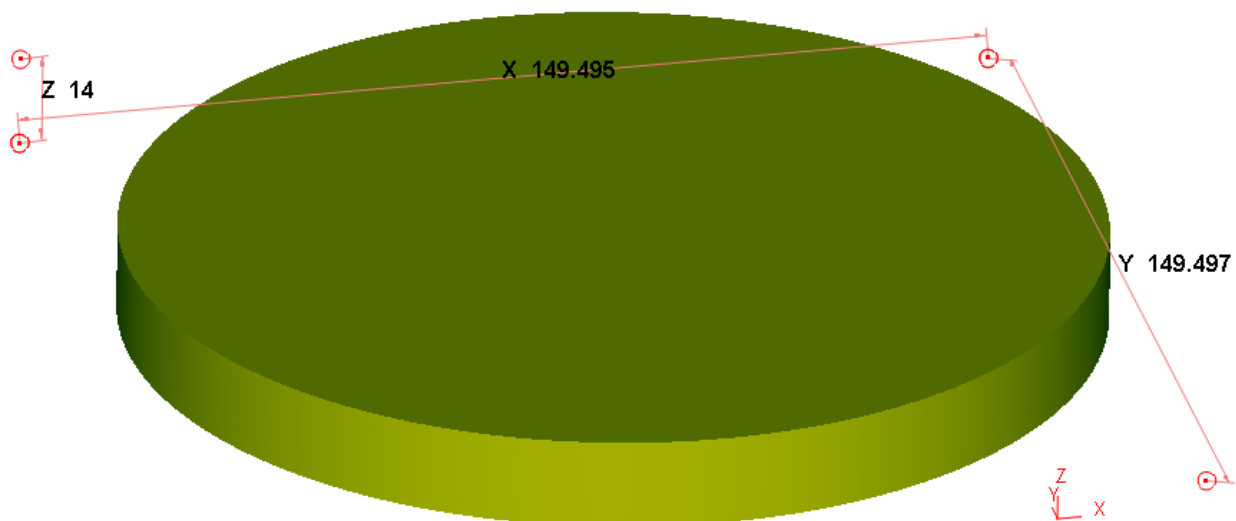


Рис.3.3. Модель заготовки із програми DEFORM для штампування крильчатки із аксіальними тонкостінними елементами.

При комп'ютерному моделюванні ізотермічного штампування крильчатки із аксіальними тонкостінними елементами в програмі DEFORM плоску круглу заготовку розбили на 506263 скінченних елемента. На рис.3.4 показано скінченно-елементну модель заготовки із програми DEFORM.

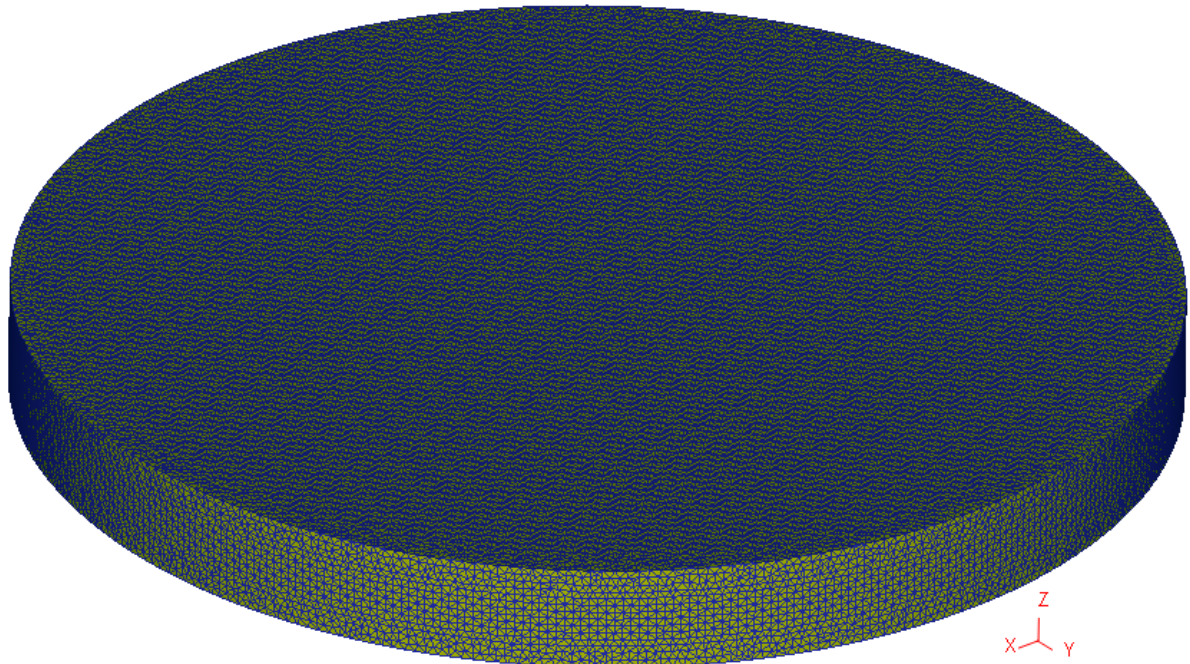


Рис.3.4. Скінченно-елемента модель плоскої заготовки із програми DEFORM.

Швидкість переміщення головного інструменту пуансона поставили 0,1 мм/с.

Температура заготовки – 450 °С, температура пуансона та матриці – 450 °С.

Всі параметри технологічного процесу та задані граничні умови для комп'ютерного моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) в програмі DEFORM процесу гарячого ізотермічного штампування деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами із плоскої круглої заготовки вказано в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Параметри технологічного процесу та задані граничні умови для комп'ютерного моделювання ізотермічного штампування деталі «Крильчатка»

№	Параметри	Показник
1.	Матеріал заготовки	7075 (B95)
2.	Тип об'єкту заготовки	Пластичний
3.	Температура заготовки, °C	450
4.	Температура інструментів, °C	450
5.	Тип об'єкту інструментів	жорсткий
6.	Коефіцієнт тертя	0,4 по Зібелю
7.	Кількість скінченних елементів	506263
8.	Швидкість пуансона, мм/с	0,1
9.	Переміщення пуансона, мм	6
10.	Кількість кроків моделювання	24
11.	Розмірність кроку, мм/крок	0,25

3.2. Результати комп'ютерного моделювання за допомогою МСЕ процесу гарячого ізотермічного штампування деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами.

На рис. 3.5 показано графік залежності зусилля деформування від переміщення головного інструменту (пуансона), який було отримано за результатами чисельного моделювання методом скінченних елементів процесу гарячого ізотермічного штампування деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами в програмному комплексі DEFORM.

Як бачимо, із рис. 3.5 різке зростання зусилля деформування відбувається в кінці робочого ходу пуансона після переміщення його на 5 мм. Це можемо пояснити тим, що в саме цей момент відбувається повне

заповнення порожнин матриці в місцях лопаток деталі «Крильчатка». Таким чином, максимальне зусилля деформування при переміщенні пуансона на 6 мм становить $P_d = 190 \text{ тс} = 1863 \text{ кН} \approx 1,9 \text{ МН}$.

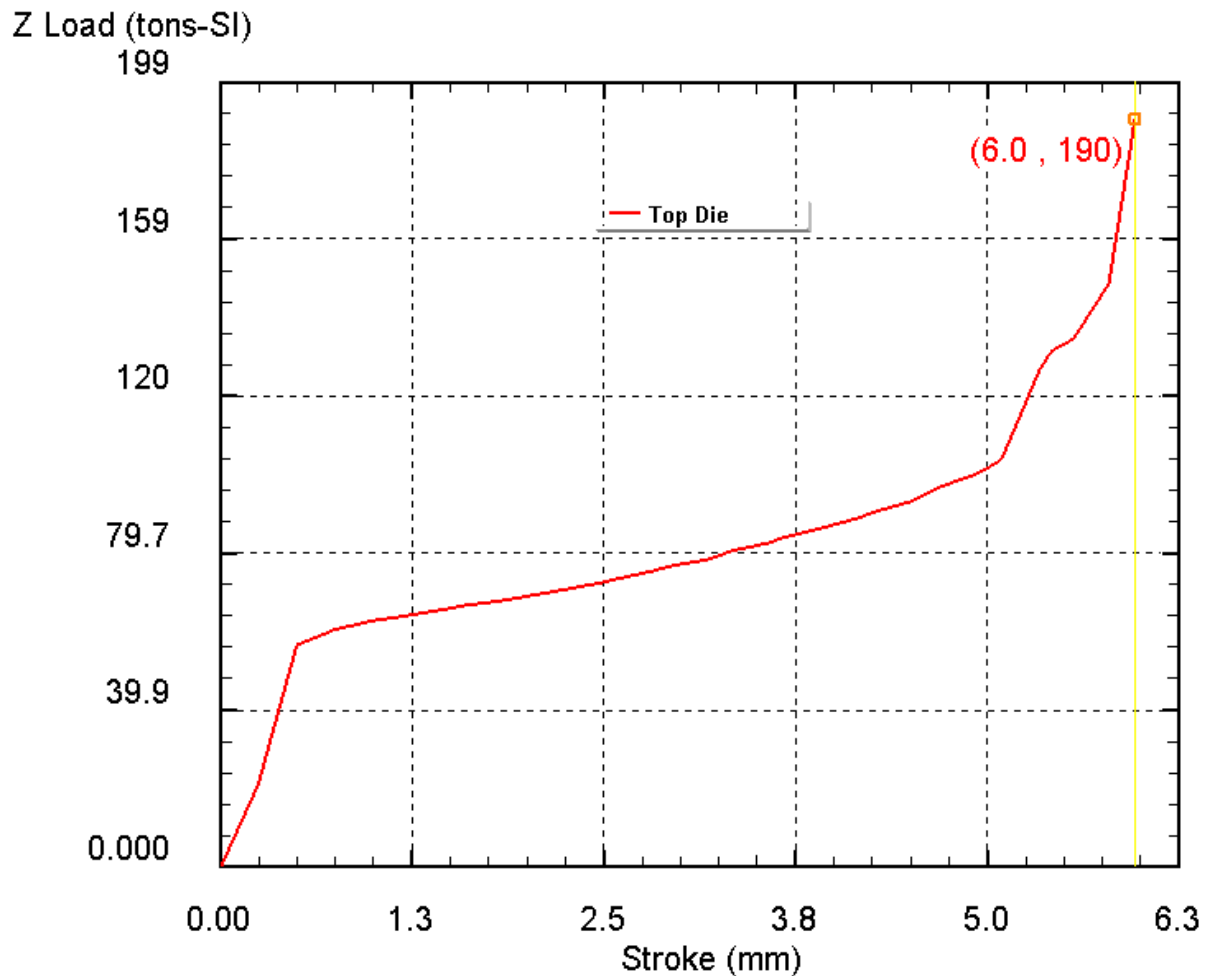
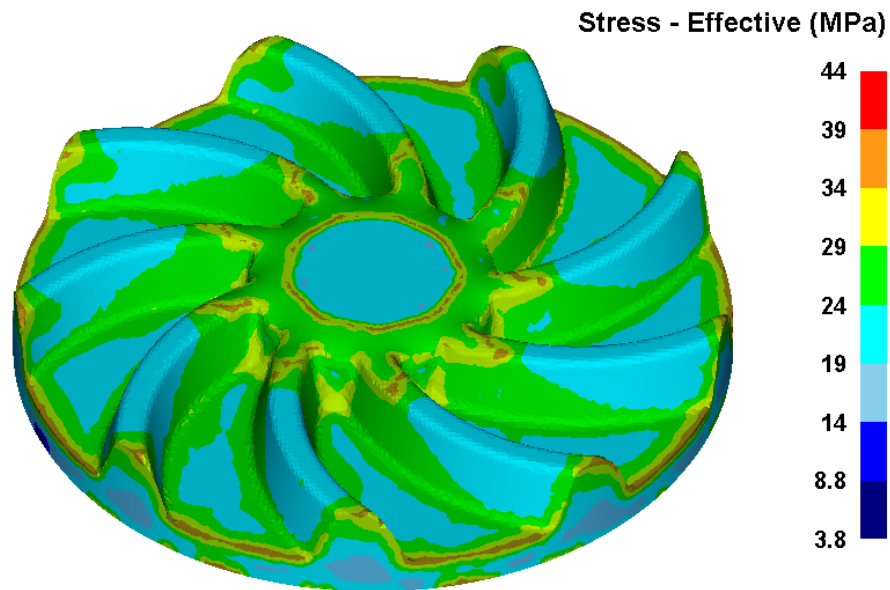


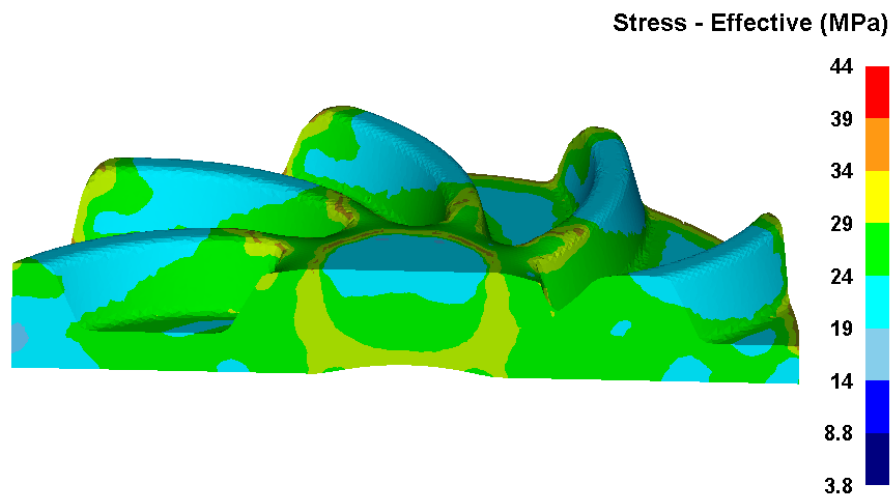
Рис.3.5. Залежність зусилля деформування від переміщення пуансона при ізотермічному штампуванні деталі «Крильчатка».

На рис. 3.6 показано розподіл інтенсивності напружень σ_i в zdeформованому викові деталі «Крильчатка». Як бачимо, найбільша інтенсивність напружень σ_i відповідає місцям переходу від центральної частини деталі до лопаток та становить в $\sigma_i = 24 - 29 \text{ МПа}$. В місцях лопаток,

що ближче до зовнішнього діаметру значення зменшується до $\sigma_i = 19 - 24$ МПа.



а)

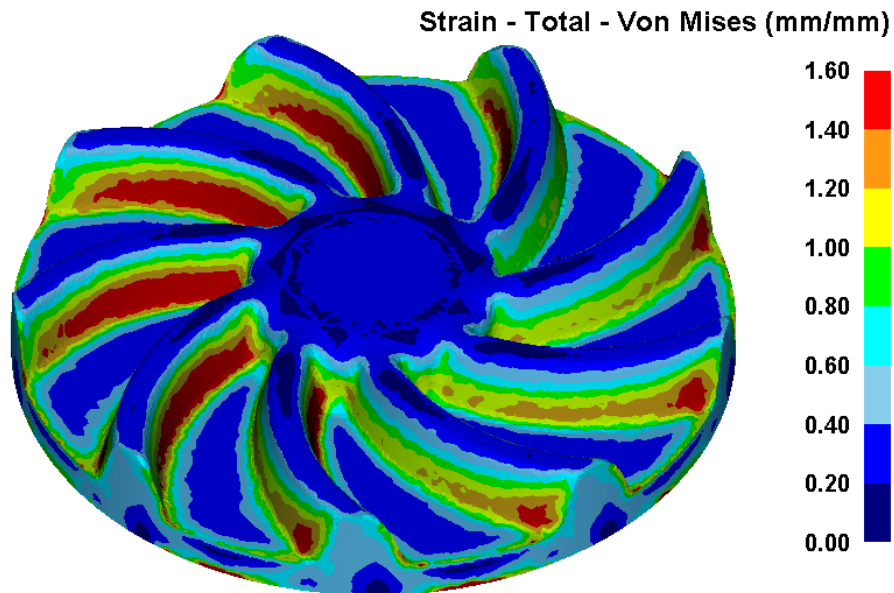


б)

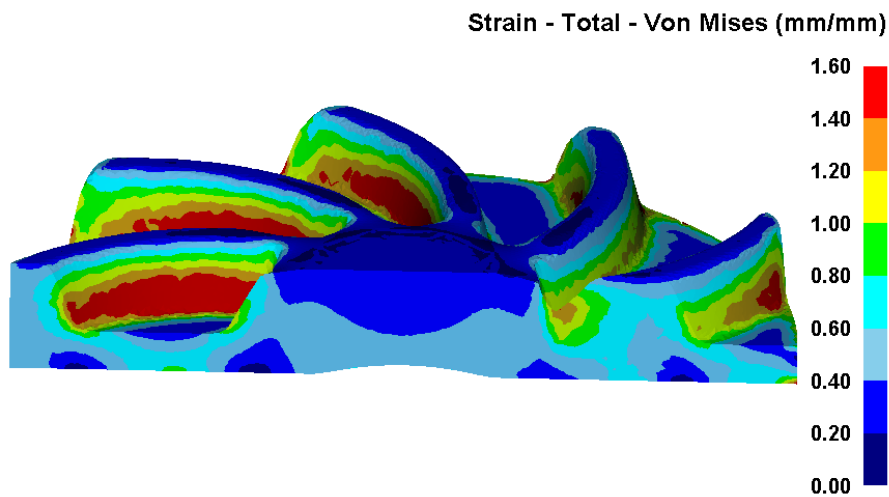
Рис.3.6. Розподіл інтенсивності напружень σ_i в zdeформованій крильчатці:
а – по всьому об'єму заготовки, б – в перерізі

На рис. 3.7 показано розподіл інтенсивності деформацій ε_i в zdeформованому вковій деталі «Крильчатка». Як бачимо, найбільша

інтенсивність деформацій ε_i досягає величини $\varepsilon_i = 1,2 - 1,6$ та відповідає місцям радіусного переходу від диска крильчатки до лопаток.



а)

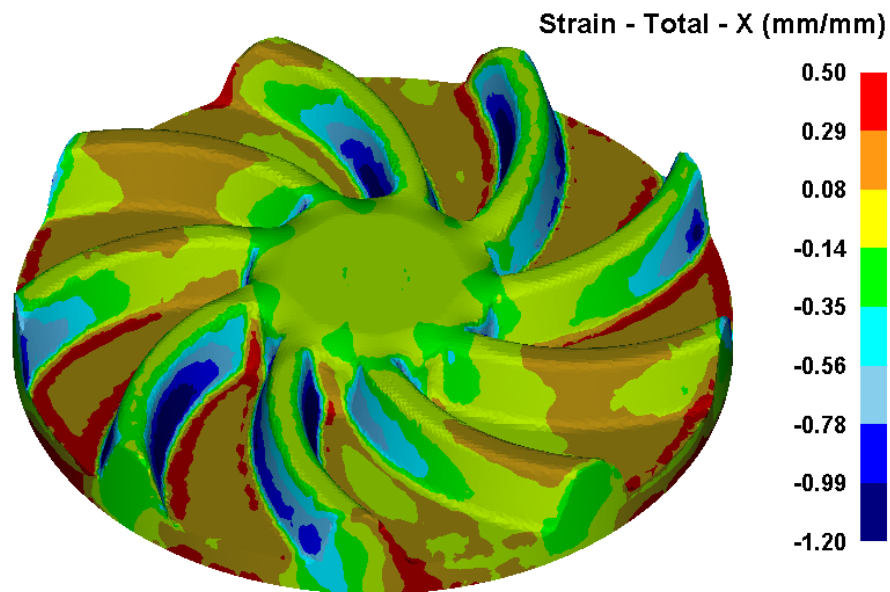


б)

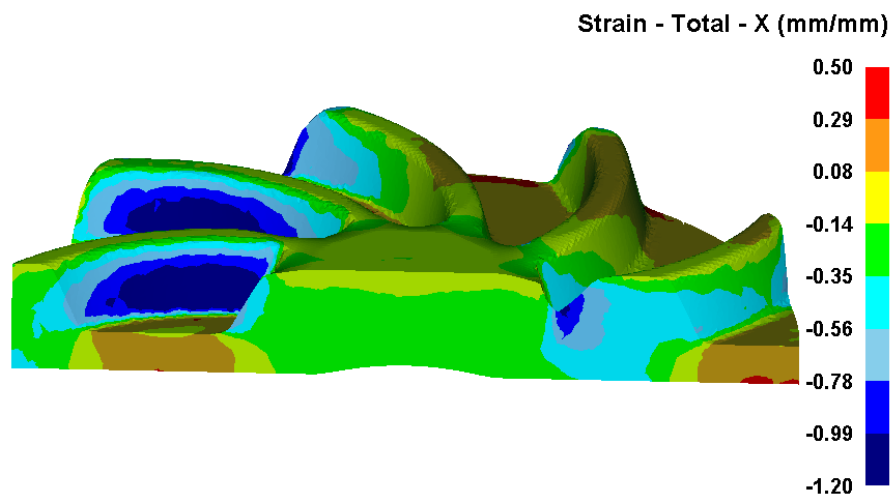
Рис.3.7. Розподіл інтенсивності деформацій ε_i в zdeформованій крильчатці:
а – по всьому об'єму заготовки, б – в перерізі

На рис. 3.8 показано розподіл деформацій ε_x в zdeформованому викові деталі «Крильчатка». Як бачимо, найбільші значення стискаючих деформацій

ε_x досягає величини $\varepsilon_x = -1,2 \div -0,78$ та відповідає місцям радіусного переходу від диска крильчатки до лопаток.



а)



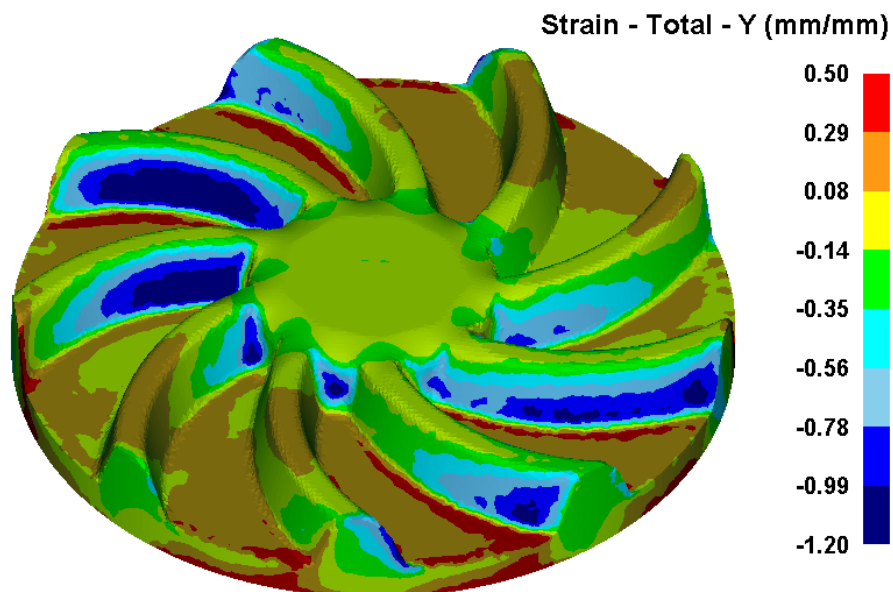
б)

Рис.3.8. Розподіл деформацій ε_x в zdeформованій крильчатці:

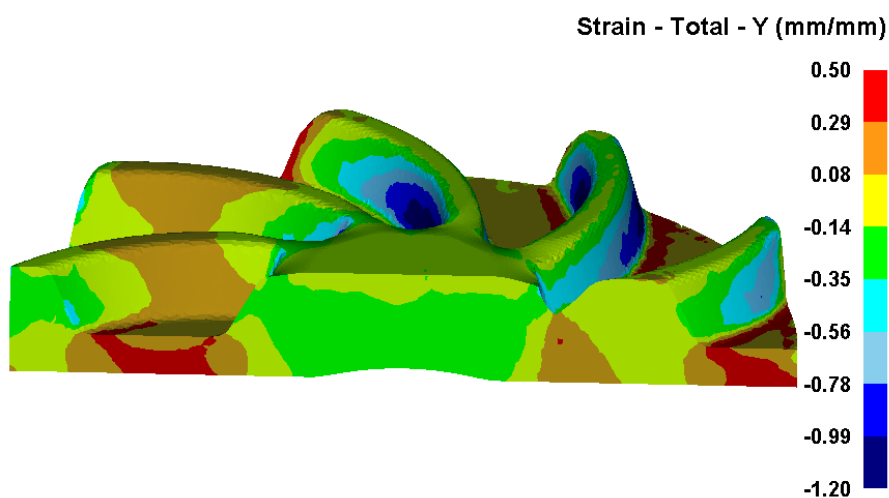
а – по всьому об'єму заготовки, б – в перерізі

На рис. 3.9 показано розподіл деформацій ε_y в zdeформованому викові деталі «Крильчатка». Як бачимо, найбільші значення стискаючих деформацій

ε_y досягає величини $\varepsilon_y = -1,2 \div -0,78$ та відповідає місцям радіусного переходу від диска крильчатки до лопаток.



а)



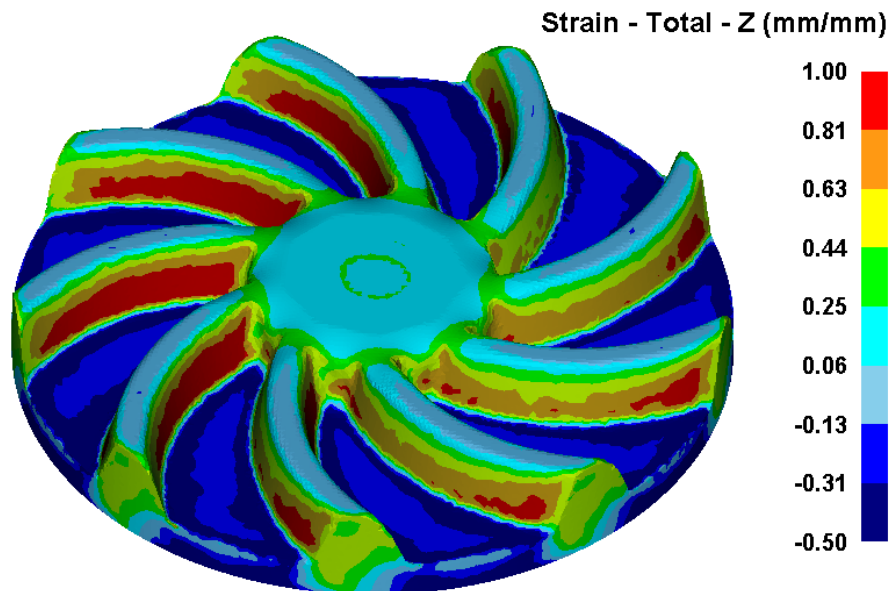
б)

Рис.3.9. Розподіл деформацій ε_y в zdeформованій крильчатці:

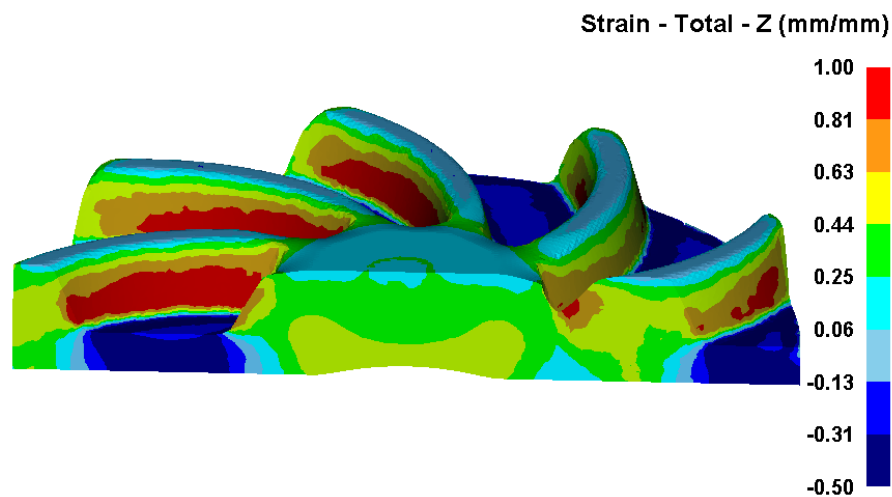
а – по всьому об'єму заготовки, б – в перерізі

На рис. 3.10 показано розподіл деформацій ε_z в zdeформованому викові деталі «Крильчатка». Як бачимо, найбільші значення стискаючих деформацій ε_z досягає величини $\varepsilon_z = -0,5 \div -0,13$ в зоні диску заготовки. В свою чергу,

найбільші ж значення розтягувальних деформацій ε_z досягає величини $\varepsilon_z = 0,63 \div 1,0$ та відповідає місцям радіусного переходу від диска крильчатки до лопаток.



а)



б)

Рис.3.10. Розподіл деформацій ε_z в zdeформованій крильчатці:

а – по всьому об'єму заготовки, б – в перерізі

На рис. 3.11 показано розподіл середніх напружень $\sigma_{\text{сер}}$ в zdeформованому викові деталі «Крильчатка». Як бачимо, найбільші значення стискаючих середніх напружень $\sigma_{\text{сер}}$ відповідає диску заготовки та на краях лопаток та становить в $\sigma_{\text{сер}} = -150 \div -110$ МПа.

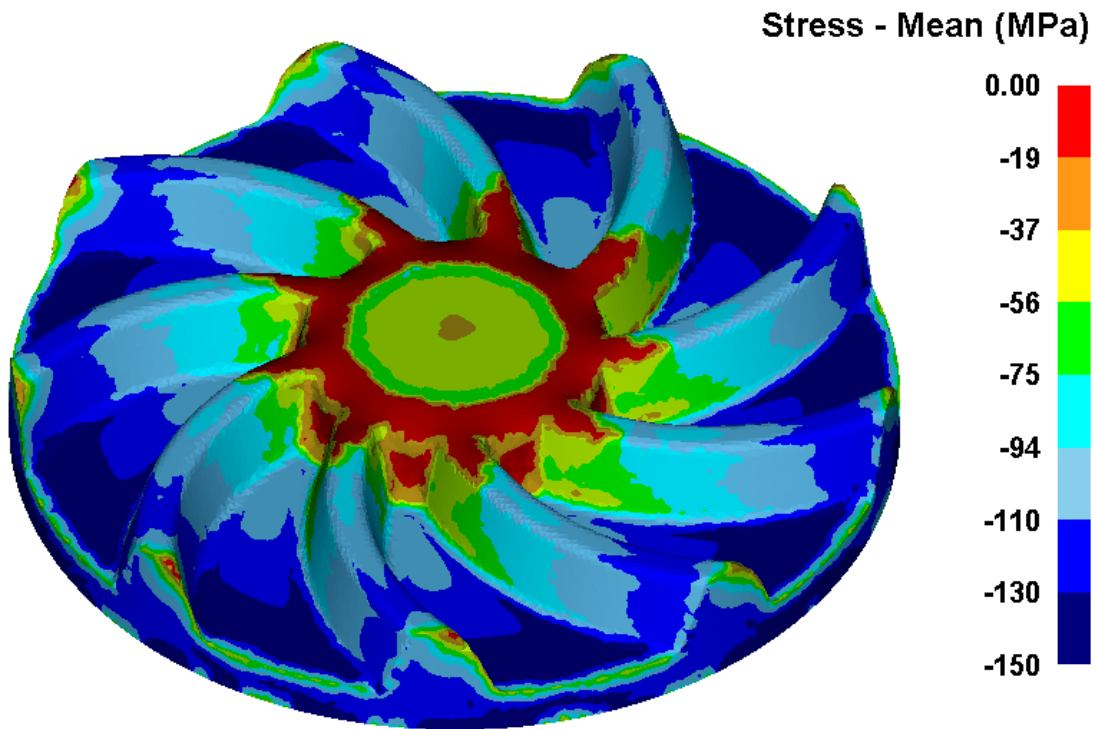


Рис.3.11. Розподіл середніх напружень $\sigma_{\text{сер}}$ в zdeформованій крильчатці по всьому об'єму заготовки

На рис. 3.12 показаний розподіл коефіцієнта використання ресурсу пластичності в кінці деформування по всьому об'єму zdeформованого викову крильчатки. Як бачимо, найбільше значення є в тілі лопаток та не перевищує 0,2. Це є допустимим та не призведе до руйнування.

На рис. 3.13 показано форму та розміру zdeформованого напівфабрикату деталі «Крильчатка».

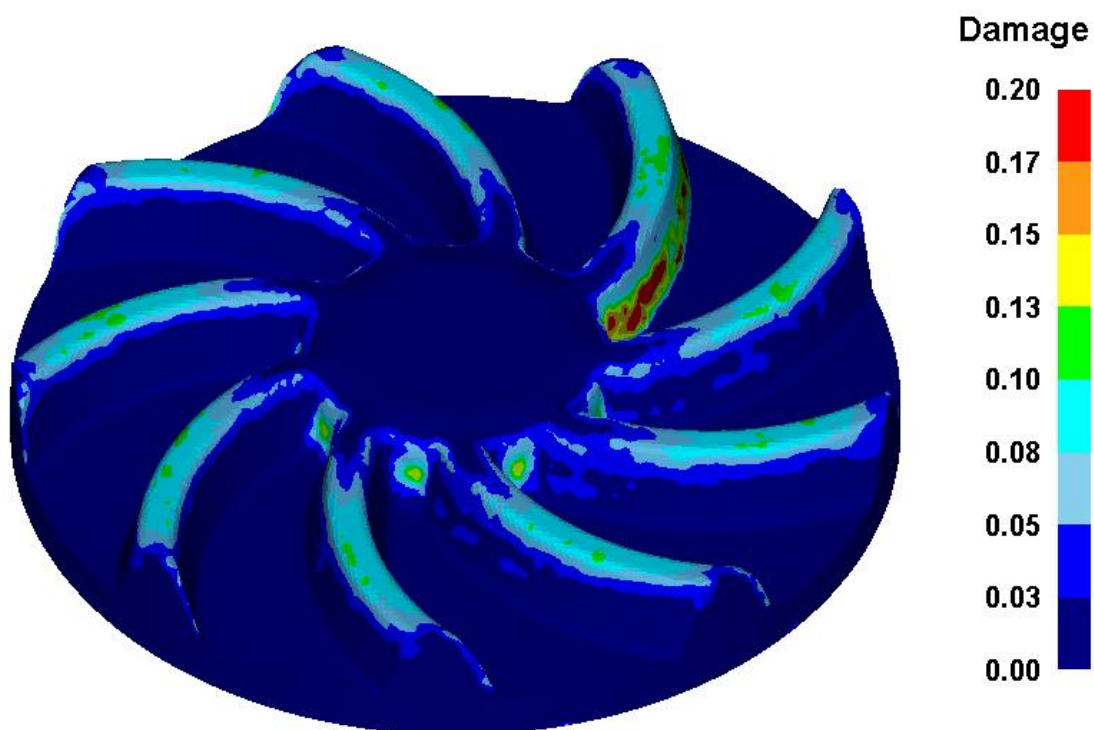


Рис. 3.12. Розподіл коефіцієнта використання ресурсу пластичності в здеформованому напівфабрикаті деталі «Крильчатка».

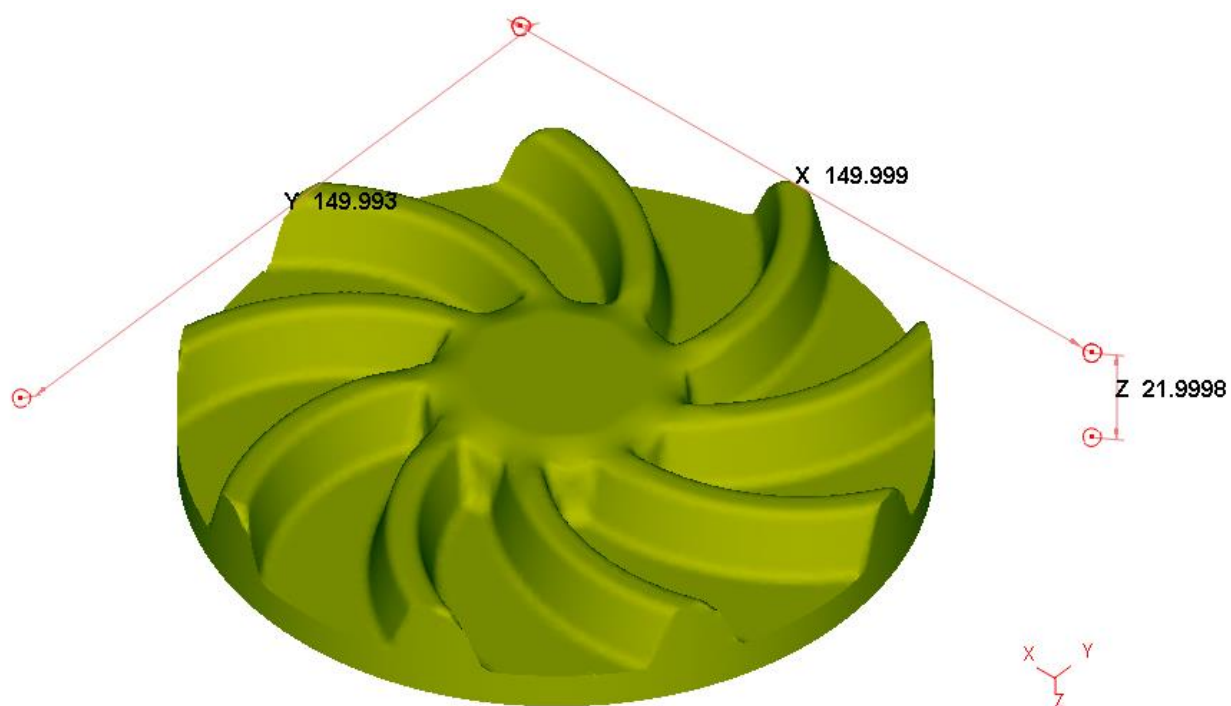


Рис. 3.13. Форма та розміри здеформованого напівфабрикату деталі «Крильчатка».

3.3. Висновки по розділу.

В даному розділі були викладені результати по чисельному моделюванню методом скінченних елементів в програному середовищі DEFORM процесу ізотермічного штампування викову деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами із алюмінієвого сплаву 7075 (аналог В95).

Вказані розрахункові схеми процесу, задані граничні умови, вихідна заготовки та інші технологічні параметри для моделювання процесу ізотермічного штампування. Показано графік залежності зусилля деформування від переміщення пуансону при гарячому ізотермічному штампуванні. Встановлений напружено-деформований стан здеформованого виковів та критерію руйнування в кінці деформування.

РОЗДІЛ 4

КОНСТРУЮВАННЯ ШТАМПОВОГО ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ІЗОТЕРМІЧНОГО ШТАМПУВАННЯ ВИКОВУ ДЕТАЛІ «КРИЛЬЧАТКА»

На рис. 4.1 показано спроектоване штампове оснащення для виготовлення викову деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами ізотермічним штампуванням.

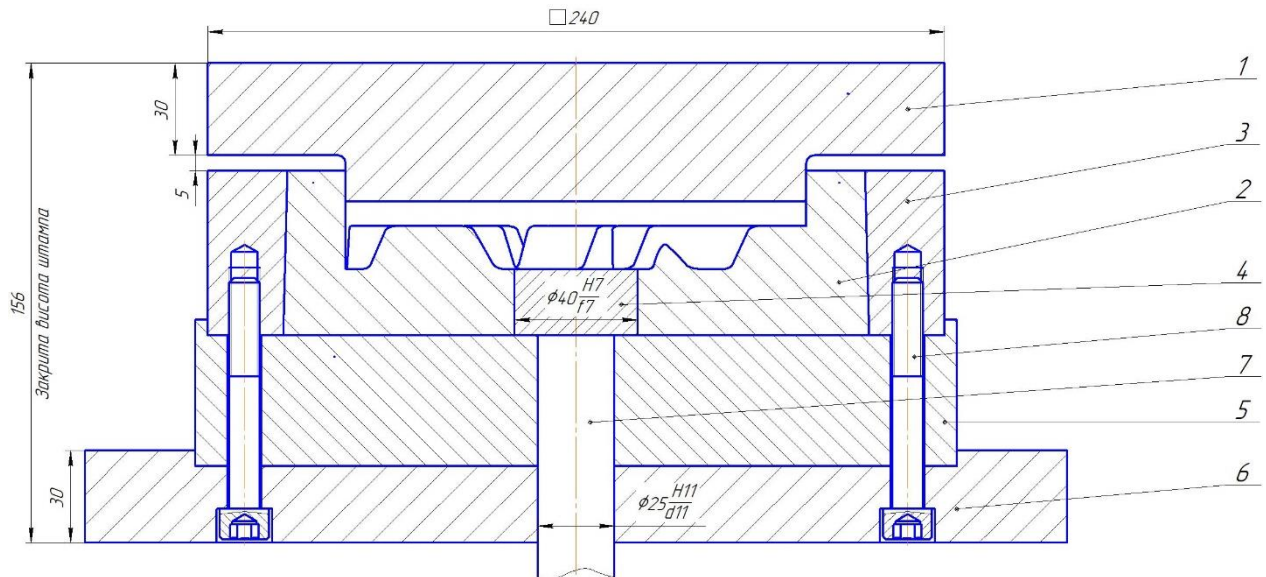


Рис.4.1. Штамп для ізотермічного штампування виковів деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами.

Верхня частина штампу для гарячого ізотермічного штампування виковів деталей «Крильчатка» складається із пуансона 5. Він кріпиться до повзуна преса за допомогою пазів, які розташовані по кутах у ньому. В нижній частині штампу одnobандажована матриця 2 та 3 кріпиться до нижньої плити 6 гвинтами 8. Бандаж разом із матрицею впресовані у опорну плиту 5, що в свою чергу впресована на нижню плиту 6. В матрицю 2 встановлена по посадці з зазором вставка 4, яку виштовхує виштовхувач 7 для того, щоб виштовхнути виков.

На рис. 4.2 показано вигляд згори на нижню плиту штампа.

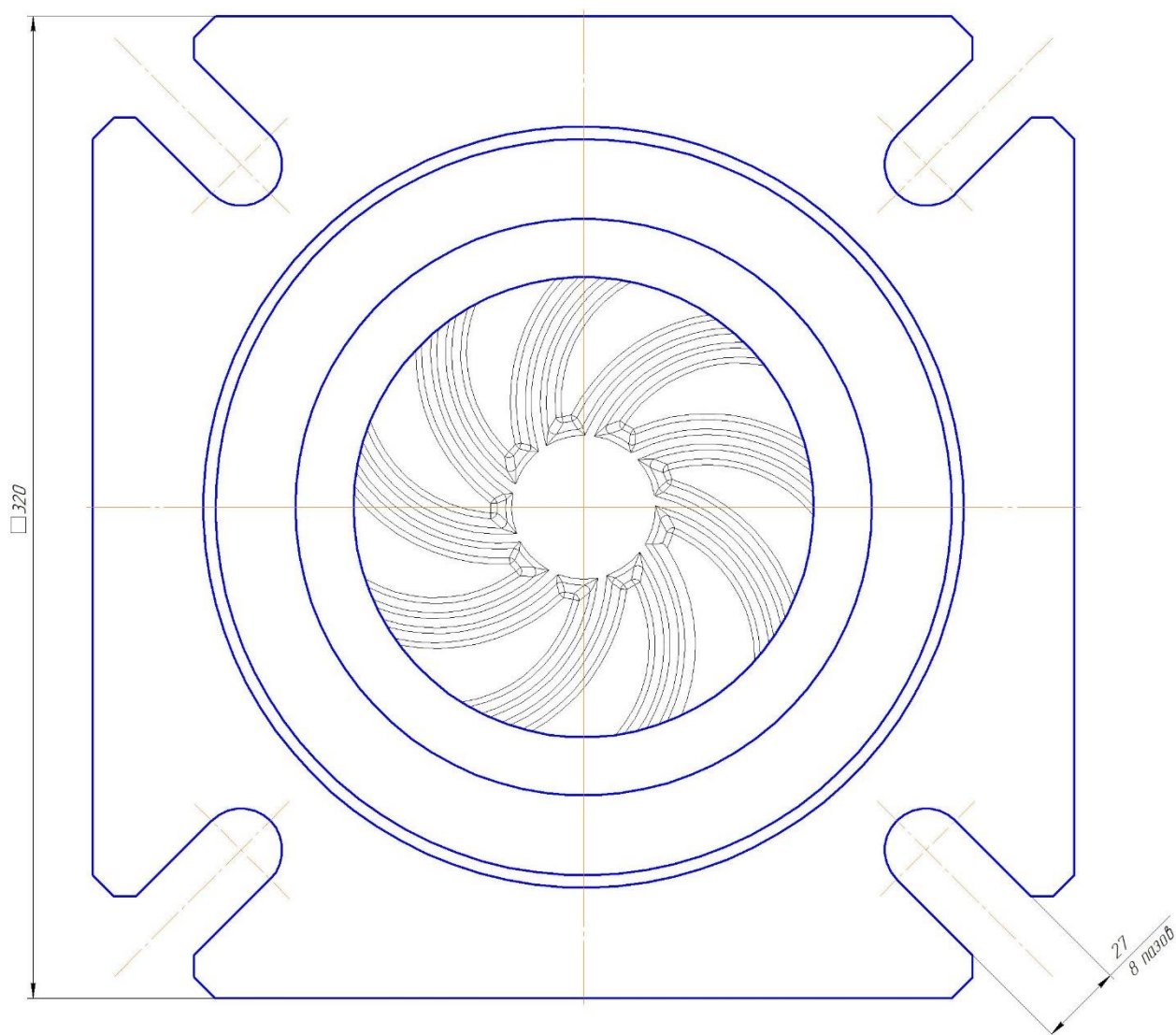


Рис.4.2. Вигляд згори на нижню плиту штампа для гарячого ізотермічного штампування виковів деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами.

Штампове оснащення встановлюється на гідравлічний прес ДГ2436 зусиллям 400 тон. Зварена рамна станина цього пресу забезпечує мінімальні деформації її розкриття при максимальному навантаженні. Повзун конструктивно містить Т-пази для кріплення формувальних та нагрівальних плит фіксується на поршнях циліндрів, які, в свою чергу, входять в направляючі станини.

Технічні характеристики пресу наведені в табл. 4.1.

Табл. 4.1 – Технічні характеристики пресу ДГ2436

Номінальне зусилля, т	400
Хід ползуна, мм	800
Найбільша відстань між столом та повзуном , мм	1400
Розміри столу, мм	1250×1120
Зусилля виштовхувача, кН	630
Хід виштовхувача, мм	630
Швидкість холостого повзуна, мм/с (не менше)	
вниз	200
вгору	70
Швидкість робочого ходу повзуна, мм/с (не менше)	5-0,1
Витримка під тиском, с	0-1000
Маса пресу, кг	14600

Прес обладнаний виштовхувачем, та може використовувати режим підпресовок з зупинкою двигуна на період витримки. Крім того, під час тривалих витримок допускається підживлення основного тиску.

Штампове оснащення встановлюється в установку для ізотермічного пресування, яка складається з двох підкладних плит з нагрівальними елементами, яка в свою чергу прикріплюється до верхньої та нижньої плит гідравлічного пресу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В ході магістерської дисертації була проведена робота, яка направлена на розробку технології та оснащення для виготовлення деталі «Крильчатка».

В загальному в роботі виконано:

1. Проведено літературно-патентний огляд джерел процесів ізотермічного формоутворення моноколів. Розглянуто конструкції моноколів авіаційних двигунів та існуючі технології їх виготовлення. Проаналізовано особливості ізотермічного формоутворення моноколів при температурах гарячої пластичної деформації (ГПД).

2. Виконано конструкторсько-технологічний аналіз деталі «Крильчатка» із аксіальними тонкостінними елементами та розроблено технологію її виготовлення методами гарячого штампування.

3. Проведено розрахунок комп'ютерними чисельними методами гарячого ізотермічного формоутворення деталі моноколеса типу крильчатка із алюмінієвого сплаву В95 та проаналізовано отримані результати.

4. За результатами проведеного конструкторсько-технологічного аналізу та комп'ютерного моделювання процесу ізотермічного штампування моноколеса типу крильчатка спроектовано штампове оснащення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Саидрацкий. – Пермь, изд. ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с.
2. В.А. Кириллин и др. Техническая термодинамика. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. С.М. Шляхтенко и др. Теория воздушно-реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1975.
4. А.Л. Клячкин. Теория воздушно-реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1969.
5. Богуслаев В.А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В.А. Богуслаев, В.К. Яценко, В.Ф. Притченко. – К.: Манускрипт, 1993. – 332 с.
6. Богуслаев В.А. Технология производства авиационных двигателей / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, В.Ф. Мозговой. – Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2000. – 945 с.
7. Братухин А.Г. Современные технологии авиастроения / А.Г. Братухин, Ю.Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.
8. Зубов В.П. Анализ конструктивно-технологических особенностей монолитных колес газотурбинных двигателей / В.П. Зубов, Г.А. Пудовина // Приложение к журналу «Авиационная промышленность». – 1990. - № 2.
9. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / К.В. Холщевников. – М.: Машиностроение, 1986.
10. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть 1 / В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко и др. – Запорожье: Мотор Сич, 2003. – 396 с.
11. Воробьев В.М. Развитие процессов точной штамповки при производстве двигателей и турбоагрегатов / В.М. Воробьев, А.В. Соколов // Двигатель. – 2010. – № 5(71). – С. 51-54.

12. Основы теории и реализация технологических решений процессов выдавливания металлов в многоканальных штампах [учебное пособие] / В.М. Воробьев. – Москва, 2012. – 289 с.
13. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / К.В. Холщевников. – М.: Машиностроение, 1970. – 614 с.
14. Воробьев В.М. К вопросу о возможности изготовления моноштампованных винтов судовых движителей // Судностроение. – 2012. – № 4. – С. 55-57.
15. Теорія та практика обробки металів тиском / Під ред. Богуслаєва В. О., Бобиря М. І., Тітова В. А., Качана О. Я. – Запоріжжя : АТ «Мотор Січ», 2016. – 522 с.
16. Данилов Ю. П. Новые технологии получения турбинных колес с лопатками / Ю. П. Данилов, И. И. Осипов, В. М. Воробьев // Авиационная промышленность. – 1974. – № 12. – С. 18–19.
17. Осипов И. И. Высокоскоростная радиальная штамповка рабочих колес турбоагрегатов / И. И. Осипов, В. М. Воробьев // Авиационная промышленность. – 1976. – № 2.
18. Воробьев В. М. Основы теории и реализация технологических решений процессов выдавливания металлов в многоканальных штампах / В. М. Воробьев. – Москва, 2012. – 289 с.
19. Кутин А. А. Передовые технологии производства сложнопрофильных изделий авиадвигателестроения на примере изготовления моноколес газотурбинных двигателей // А. А. Кутин, М. В. Туркин / Межотраслевая информационная служба [Электронный ресурс]. – 2012. – № 4. – С. 52–57. — Режим доступа: <http://www.vimi.ru>
20. Изготовление деталей пластическим деформированием / К.Н. Богоявленский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.

21. Крымов В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин. – М. : Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2002.– 376 с.
22. Анищенко, А. С. Анализ альтернативных технологий штамповки компрессорных лопаток для судовых двигателей / А. С. Анищенко // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2015. – Вип. 30, Т. 1. – С. 141–148. – (Серія : Технічні науки).
23. Анищенко А.С. Состояние и перспективы внедрения в судостроении изотермического деформирования и деформирования в режиме сверхпластичности / А.С. Анищенко, М.А. Цепин, Д.И. Чашников // Судостроительная промышленность. Серия : Металлургия и металловедение. – 1987. – Вып.4. – С. 48-52.
24. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / В.А. Голенков [и др.]. – М. : Машиностроение, 2004. – 464 с.
25. Бочаров Ю.А. Винтовые прессы / Ю.А. Бочаров // Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2009. – №5. – С. 16-18.
26. Проблемы технологии изготовления лопаток компрессоров ГТД : Материалы совещания. – М.: НИАТ, 1982. – 114 с.
27. Гайлит Ю.Т., Саушкин Б.П. Технологическое обеспечение производства новых изделий./ Крылья Родины, №10. 2007.- С. 35-40.
28. Ножницкий Ю.А. Разработка ключевых (критических) технологий для создания новых поколений ГТД /Новые технологические процессы и надежное ГТД. Научно-технический сб. -М.: ЦИАМ, 1999. С. 5-34.
29. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинного двигателя. М.: Машиностроение, 2006.- 256 с.
30. Астахов Юрий Павлович, Моргунов Юрий Алексеевич, Саушкин Борис Петрович, Шандров Борис Васильевич Анализ эффективности

гидроабразивной вырезки межлопаточных каналов в моноколесах // Металлообработка. 2012. №5-6 (71-72).

31. Вивденко Юрий Николаевич, Ляшков Алексей Ануфриевич, Шутов Андрей Николаевич, Егоров Сергей Михайлович Технологические схемы формообразования сложных поверхностей деталей // Металлообработка. 2010. №5 (59).

32. Саушкин Б.П. Гидроабразивная резка. Технологии и применение // Ритм. 2012. № 4. С. 68-74.

33. Momber A., Kovacevic R. Principles of Abrasive Water Jet Machining. Berlin: Springer Verlag, 1998.

34. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора, часть 1. Монография / Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др. Запорожье: изд. ОАО “Мотор Сич”, 2003. – 396 с.

35. Богуслаев А.В., Качан А.Я., Карась В.П. Высокоскоростное финишное фрезерование лопаток моноколес // Вестник двигателестроения, 2002. – №1. – С. 110-111.

36. Жеманюк П.Д., Мозговой В.Ф., Качан А.Я., Карась В.П. Формирование сложнопрофильных поверхностей моноколес высокоскоростным фрезерованием // Газотурбинные технологии. – 2003. – №5(26). – С. 18-21.

37. Жеманюк П.Д., Богуслаев А.В., Мозговой С.В., Карась Г.В., Качан А.Я. Формообразование сложнопрофильных поверхностей осевого моноколеса с широкохордными лопатками высокоскоростным фрезерованием // Вестник двигателестроения. – 2004. – №3. – С. 16-19.

38. Жеманюк П.Д., Богуслаев А.В., Мозговой С.В., Карась Г.В., Качан А.Я. Обработка проточных поверхностей моноколес высокоскоростным

фрезерованием // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – №7 (15). – С. 215-219.

39. Горелов В. А., Аршинов С. В., Максимов Ю. В., Пини Б. Е., Бекаев А. А., Мерзликин В. Г., Второва А. Ю. К вопросу выбора технологии обработки сложнопрофильных изделий (на примере лопаток моноколес газотурбинных двигателей) // Известия МГТУ. 2012. №2.

40. А. Я. Качан, С. А. Петров, В. А. Панасенко, С. В. Мозговой, Г. В. Карась Технология обработки моноколёс высокоскоростным фрезерованием // Вісник двигунобудування. 2006. №1.

41. Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора., часть 1. Монография. г. Запорожье, изд. ОАО "МоторСич", 2003г. – 396 с.

42. Богуслаев А.В., Качан А.Я., Карась В.П. Высокоскоростное финишное фрезерование лопаток моноколес // Вестник двигателестроения, 2002 г., – № 1. – С. 110-111.

43. Жеманюк П.Д., Мозговой В.Ф. Качан А.Я., Карась В.П. Формообразование сложнопрофильных поверхностей моноколес высокоскоростным фрезерованием // Газотурбинные технологии, 2003 г. – №5 (26). – С. 18-21.

44. Патент РФ № 2011124064/06, 15.06.2011. Способ изготовления интегрального блиска с неохлаждаемыми рабочими лопатками для газотурбинного двигателя и интегральный блиск // Патент России № 2467167. 2012. Бюл. № 32. / Магеррамова Л.А., Кратт Е.П., Ясинский В.В. [и др.].

45. Воробьёв В.М., Муравьёв П.Н. Исследования и разработка процессов изготовления цельноштампованных рабочих колес вентиляторов ГТД с широкохордными лопатками // Заготовительные производства в машиностроении. № 6. 2010.

46. Теорія та практика обробки металів тиском / Під ред. Богуслаєва В. О., Бобиря М. І., Тітова В. А., Качана О. Я. – Запоріжжя : АТ «Мотор Січ», 2016. – 522 с.

47. Данилов Ю. П. Новые технологии получения турбинных колес с лопатками / Ю. П. Данилов, И. И. Осипов, В. М. Воробьев // Авиационная промышленность. – 1974. – № 12. – С. 18–19.

48. Осипов И. И. Высокоскоростная радиальная штамповка рабочих колес турбоагрегатов / И. И. Осипов, В. М. Воробьев // Авиационная промышленность. – 1976. – № 2.

49. Воробьев В. М. Основы теории и реализация технологических решений процессов выдавливания металлов в многоканальных штампах / В. М. Воробьев. – Москва, 2012. – 289 с.

50. Титов А. В. Некоторые особенности изотермической штамповки точных деталей с тонкостенными элементами / А. В. Титов, А. Ю. Басов, А. Д. Лавриненков, П. С. Вишневский, О. Н. Лысенко, В. А. Титов // Обработка материалов давлением. - 2018. - № 1. - С. 105-115.

ДОДАТОК. СПЕЦИФІКАЦІЯ