

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра підтримання льотної придатності повітряних суден

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

канд. техн. наук, доц.

_____ О. В. Попов

«___» _____ 2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ
«МАГІСТР»

Тема: «Підвищення ефективності складання крил сучасних літаків»

Виконав: _____ **В.В. Гапон**

Керівник: к.т.н., доцент _____ **М.Д. Туз**

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

охорона праці: к.т.н., доцент _____ **В.І. Казанець**

охорона навколишнього
середовища: к.т.н., доцент _____ **Т.І. Білик**

Нормоконтролер: _____ **А.М. Хімко**

Київ 2020

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Аерокосмічний факультет

Кафедра підтримання льотної придатності повітряних суден

Освітній ступень «Магістр»

Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»

Освітньо-професійна програма «Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

канд. техн. наук, доц.

_____ О. В. Попов

«___» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

ГАПОНА ВЯЧЕСЛАВА ВОЛОДИМИРОВИЧА

1. Тема роботи: «**Підвищення ефективності складання крил сучасних літаків**» затверджено наказом ректора від 02 жовтня 2020 року № 1881/ст.
2. Термін виконання роботи: з 05 жовтня 2020 р. по 13 грудня 2020 р.
3. Вихідні дані до роботи: конструкція крил сучасних літаків, дані про технології виготовлення конструктивно-силових елементів крила, остаточного складання крила та стикування консольних частин крила з центропланом.
4. Зміст пояснювальної записки: аналіз конструкції крил сучасних літаків, аналіз технологій виготовлення конструктивно-силових елементів крила, остаточного складання крила та стикування консольних частин крила з центропланом. Аналіз та створення 3D-моделі монолітної нервюри крила літака. Розрахунок часу виготовлення, використання енергії, економічних витрат виробництва нервюри фрезерним комплексом. Аналіз адитивного виробництва, топологічна оптимізація нервюри. Розрахунок часу виготовлення, використання енергії, економічних витрат виробництва нервюри обладнанням SLM. Порівняння оптимальності виготовлення нервюр за допомогою субтрактивної і адитивної

технологій. Розробка заходів з охорони праці та охорони навколишнього середовища

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: модель кореневої нервюри Ан-148, модель нервюри з оптимізованою топологією, порівняльні гістограми розрахунків виготовлення технологією фрезерування та SLM.

6. Календарний план-графік

Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
Літературний огляд матеріалів за науковим напрямом дипломної роботи	05.10 – 12.10.2020 р.	
Аналіз конструкції кесонного крила та методів його виробництва	13.10 – 18.10.2020 р.	
Визначення оптимальності виготовлення нервюри фрезеруванням	19.10 – 28.10.2020 р.	
Підвищення ефективності виробництва нервюр шляхом запровадження адитивної технології	29.10 – 20.11.2020 р.	
Виконання окремих розділів: охорона праці та охорона навколишнього середовища	21.11 – 13.12.2020 р.	
Попередній захист дипломної роботи	13.12.2020 р.	

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (науковий ступень, посада П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доц. В.І. Казанець		
Охорона навколишнього середовища	к.т.н., доц. Т.І. Білик		

8. Дата видачі завдання: " ____ " _____ 2020 р.

Керівник дипломної роботи

(підпис)

М.Д. Туз

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

В.В. Гапон

(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи: «Підвищення ефективності складання крил сучасних літаків»:

116 с., 40 рис., 5 табл., 37 джерел.

Об'єкт дослідження – складання крил сучасних літаків.

Предмет дослідження – вдосконалення процесу складання крил сучасних літаків.

Метод дослідження – для вирішення поставлених завдань використовувалися методи аналізу конструкції крила, а також технологій виготовлення конструктивно-силових елементів крила, його остаточного складання та стикування консольних частин з центропланом для виявлення неефективних технологій, розрахунковий метод для визначення оптимальності обраної технології.

Практичне значення результатів дипломного проекту визначається підвищенням ефективності складання крила, за рахунок зниження маси нервюр, трудомісткості та вартості їх виробництва.

Матеріали дипломної роботи рекомендується використовувати в навчальному процесі і практичній діяльності фахівців конструкторсько-технологічних бюро.

КРИЛО, НЕРВЮРА, ОПТИМАЛЬНІСТЬ ВИГОТОВЛЕННЯ, ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ, SELECTIVE LASER MELTING.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ КЕСОННОГО КРИЛА ТА МЕТОДІВ ЙОГО ВИРОБНИЦТВА	14
1.1 Аналіз конструкції кесонного крила.....	14
1.2 Аналіз технологій виготовлення конструктивно-силових елементів крила.....	17
1.2.1 Технології виготовлення монолітних деталей крила.....	17
1.2.2 Технології виготовлення збірних деталей крила.....	20
1.2.3 Технології виготовлення деталей крила з композитних матеріалів.....	23
1.3 Аналіз технологій остаточного складання консолей та центроплану крила.....	31
1.4 Аналіз технологій стикування консолей крила з центропланом.....	32
Висновки до розділу 1.....	37
2 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ НЕРВЮРИ ФРЕЗЕРУВАННЯМ.....	38
2.1 Аналіз та створення 3D-моделі монолітної нервюри крила літака.....	38
2.2 Розрахунок часу виготовлення нервюри фрезерним комплексом Haas UMC-1500SS DUO.....	44
2.3 Розрахунок використання енергії для виробництва нервюри фрезерним комплексом Haas UMC-1500SS-DUO.....	46
2.4 Розрахунок економічних витрат виробництва нервюри фрезерним комплексом Haas UMC-1500SS-DUO.....	48
2.4.1 Розрахунок витрат на робочу силу.....	49
2.4.2 Розрахунок витрат на матеріали.....	49

2.4.3	Розрахунок витрат на електроенергію.....	50
2.4.4	Розрахунок загальних витрат.....	51
	Висновки до розділу 2.....	52
3	ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА НЕРВЮР.....	53
3.1	Аналіз адитивного виробництва.....	53
3.2	Топологічна оптимізація нервюри та вибір обладнання для її виготовлення.....	63
3.3	Розрахунок часу виробництва нервюри на SLM 800.....	72
3.4	Розрахунок використання енергії для виробництва нервюри на SLM 800.....	73
3.5	Розрахунок економічних витрат на виробництво нервюри за допомогою SLM 800.....	73
3.5.1	Розрахунок витрат на робочу силу.....	74
3.5.2	Розрахунок витрат на матеріали	75
3.5.3	Розрахунок витрат на електроенергію.....	76
3.5.4	Розрахунок загальних витрат.....	77
3.6	Порівняння оптимальності виготовлення нервюр за допомогою субтрактивної і адитивної технологій.....	77
	Висновки до розділу 3.....	86
4	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	87
4.1	Небезпечні виробничі фактори процесу 3D друку технологією Selective Laser Melting.....	87
4.2	Організаційні та конструктивно-технологічні рішення для зниження небезпечних виробничих факторів процесу 3D друку технологією Selective Laser Melting.....	89
4.2.1	Розрахунок вентиляції виробничого приміщення з обладнанням для 3D-друку металами.....	91
4.3	Вимоги до пожежної безпеки виробничого приміщення з обладнанням для 3D-друку металами.....	94

4.4	Інструкція з техніки безпеки оператора обладнання для 3D-друку металами.....	95
	Висновки до 4 розділу.....	98
5	ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	99
5.1	Аналіз впливу на навколишнє середовище виробництва нервюр крила.....	99
5.2	Заходи щодо зменшення негативного впливу визначених факторів.....	104
	Висновки до 5 розділу.....	109
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	111
	СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	114

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КЧК – консольна частина крила;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПКМ – полімерні композитні матеріали;

САПР – система автоматизованого проектування;

ЧПУ – числово-програмне управління;

AFP – automated fiber placement;

ATL – automatic tape laying

CJP – ColorJet Printing;

FDM – Fused Deposition Modeling;

MJP – MultiJet Printing;

SLA – Laser Stereolithography;

SLM – Selective Laser Melting;

SLS – Selective Laser Sintering;

$C_{\text{роб.ЧПУ}}$ – загальні витрати на зарплатню оператора обладнання з ЧПУ за виробництво нервюри;

$C_{\text{роб/год}}$ – погодинні затрати на робочу силу;

$C_{\text{мат.ЧПУ}}$ – витрати на матеріал, при обробці на обладнанні з ЧПУ;

$C_{\text{загот.}}$ – вартість заготовки;

$C_{\text{повт.перероб.}}$ – вартість металічної стружки для повторної переробки заготовки;

$C_{\text{енерг. ЧПУ}}$ – витрати на електроенергію для виготовлення деталі на фрезерному обладнанні;

$C_{\text{роб.SLM}}$ – витрати на зарплатню оператора обладнання SLM;

$C_{\text{роб/год}}$ – годинна ставка оператора обладнання SLM;

$C_{\text{мат.SLM}}$ – витрати на матеріал, при 3D друку на обладнанні SLM;

$C_{\text{пор}}$ – вартість металевого порошку;

$C_{\text{енерг.SLM}}$ – витрати на електроенергію для виготовлення деталі на SLM обладнанні;

$C_{\text{енерг}}$ – вартість електроенергії;

$E_{\text{ЧПУ (фрезер.)}}$ – використання енергії на операції фрезерування;

$E_{\text{ЧПУ (фрезер.)}}$ – використання енергії на операції сведління;

$E_{\text{ЧПУ}}$ – використання електроенергії для виготовлення деталі на фрезерному обладнанні;

E_{SLM} – використання електроенергії на виробництво нервюри технологією SLM;

$LF_{\text{ЧПУ(фрез.)}}$ – коефіцієнт безпосередньої роботи обладнання при фрезеруванні;

$LF_{\text{ЧПУ(свердл.)}}$ – коефіцієнт безпосередньої роботи обладнання при свердлінні;

$M_{\text{загот.}}$ – маса заготовки;

$N_{\text{свердл.}}$ – швидкість обертання шпинделя;

$n_{\text{отв}}$ – кількість отворів;

$P_{\text{ЧПУ}}$ – енерговикористання станка з ЧПУ;

P_{SLM} – енерговикористання SLM обладнання;

$Q_{\text{фрез.1}}$ – швидкість видалення матеріалу в процесі початкового фрезерування;

$Q_{\text{фрез.2}}$ – швидкість видалення матеріалу в процесі чистового фрезерування;

$Q_{\text{свердл.}}$ – швидкість свердління 1 отвору;

s – глибина свердління;

$s_{\text{об.}}$ – подача ріжучого інструменту;

$t_{\text{ЧПУ}}$ – час затрачений на виготовлення деталі фрезеруванням;

$t_{\text{ЧПУ (фрезер.)}}$ – час обробки для процесу фрезерування;

$t_{\text{ЧПУ (свердл.)}}$ – час обробки для процесу свердління;

$t_{\text{зм.інстр.}}$ – час зміни інструменту;

$t_{\text{позиц.}}$ – час повороту заготовки на 180° ;

$t_{\text{налагодж.}}$ – час налагоджування;

$t_{переміщ.}$ – сумарний час переміщення шпинделя між отворами;

$t_{запуск ЧПУ}$ – час запуску станку з ЧПУ;

$t_{запуск SLM}$ – час запуску SLM обладнання;

$t_{демонт.дет}$ – час демонтажу готової деталі з робочої зони обладнання;

t_{SLM} – час виготовлення нервюри на SLM обладнанні;

$V_{фрез.1}$ – об'єм, матеріалу видалений в процесі початкового фрезерування;

$V_{фрез.2}$ – об'єм, матеріалу видалений в процесі чистового фрезерування;

v – швидкість друку принтера.

ВСТУП

Основним призначенням крила є утворення підйомної сили, необхідної для забезпечення польоту літака на всіх режимах. Разом з оперенням воно забезпечує також стійкість літака. Крило використовують для кріплення шасі, двигунів, розміщення палива [1].

При конструюванні крила мають забезпечуватися спеціальні вимоги [1]:

- мінімальний лобовий опір на розрахункових режимах польоту;
- високі несівні якості, що визначають злітно-посадкові характеристики та маневреність літака.

- висока аеродинамічна якість для підвищення дальності і висоти польоту.

- задовільні характеристики стійкості літака на всіх режимах польоту.

Ці вимоги реалізуються наданням крилу відповідної форми, яка характеризується: профілем, формою у плані, подовженням та ін. Маса крила становить 30...50% загальної маси планера літака. Вагову досконалість крила характеризують його відносною масою, яка для сучасних літаків становить 8...14% їх злітної маси [1].

Для поліпшення злітно-посадкових характеристик літака на крилі встановлюють засоби механізації – передкрилки, закрилки. Для керування літаком відносно повздожньої осі – елерони, інтерцептори, для кріплення двигунів – пілони [1].

Крило літака в польоті й на землі сприймає великі навантаження – поверхневі та масові сили. До поверхневих відносять аеродинамічні (підйомна сила, лобовий опір) і сили реакції у вузлах кріплення (згинальний момент, поперечна сила та крутний момент). До масових навантажень відносять вагу власної конструкції та вантажів розміщених у крилі та на ньому [1].

Крила більшості сучасних літаків мають кесонну конструкцію. У кесонному крилі всі елементи конструкції сприймають навантаження, тому воно має високу жорсткість і надійність конструкції. Кесон використовують для

розміщення палива, у зв'язку з цим крило повинно бути герметичне. Тому до стику від'ємної частини крила та центроплану пред'являються високі вимоги до надійності та точності виконання робіт, для забезпечення високого рівня безпеки польотів.

Конструктивно консольна частина крила (КЧК) представляє собою кесон, який утворений лонжеронами, набором нервюр, а також верхніми і нижніми панелями обшивки. На нижніх поверхнях консолей розміщені технологічні люки, які представляють собою знімні герметизовані панелі овальної форми. Технологічні люки призначені для обслуговування систем і агрегатів під час експлуатації літака, які знаходяться в порожнині кесона [1].

Центральна частина крила аналогічно консольним, складається з верхньої та нижньої панелей, лонжеронів, а також набору стійок виготовлених з монолітних профілів [1].

Обшивка крила формує поверхню крила відповідно до заданого аеродинамічного профілю та сприймає аеродинамічне навантаження від повітря як сили тиску. Від обшивки сили передаються на нервюри. Ці навантаження з нервюр передаються на стінки лонжеронів. Потоки навантажень створюють поперечну силу, яка зростає від нервюри до нервюри у напрямку від кінців крила до центроплану [1].

В крилі кесонної конструкції консолі з'єднують з центропланом за допомогою моментних вузлів на лонжеронах і контурного стикового вузла, який зв'язує панелі та стінки кесона консолі крила з центропланом. Згинальний момент у консолі крила сприймається панелями кесона та поясами лонжеронів і зрівноважується на центроплані. Поперечна сила з кесона консолі крила на центроплан передається болтами, які з'єднують стінки кесона консолі крила і центроплану та працюють на зріз. Крутний момент передається з кесона консолі на центроплан болтами, які працюють на зріз. Контурне з'єднання зв'язує панелі консолей та центроплану для передавання згинального моменту, поперечної сили і крутного моменту [1].

Основними характеристиками сучасного літального апарату, які враховуються при його проектуванні є: маса повітряного судна, міцність, технологічність, а також екологічні аспекти. Вони тісно взаємопов'язані між собою. Чим нижче маса літака, тим менше витрата палива, а також більше корисного навантаження можна завантажити в літальний апарат. Це сприятливо позначається не тільки на фінансову складову авіаційної діяльності, а й на екологію. Створення конструкції з малою масою, але високою міцністю можливо шляхом застосування сучасних матеріалів і проектуванням деталей зі складною геометричною конфігурацією. Враховуючи всі ці фактори процес виготовлення агрегатів літака дуже трудомісткий і затратний процес [1].

У зв'язку з тим, що крило – одна з основних частин літака, його маса становить 30...50% загальної маси планера літака, обрана тема «Підвищення ефективності складання крил сучасних літаків», яка націлена на зниження трудомісткості та вартості виготовлення конструктивно-силового набору крила, складання крила та його стикування до фюзеляжу, а також зниження маси конструкції за рахунок використання сучасних технологій складання та оснащення.

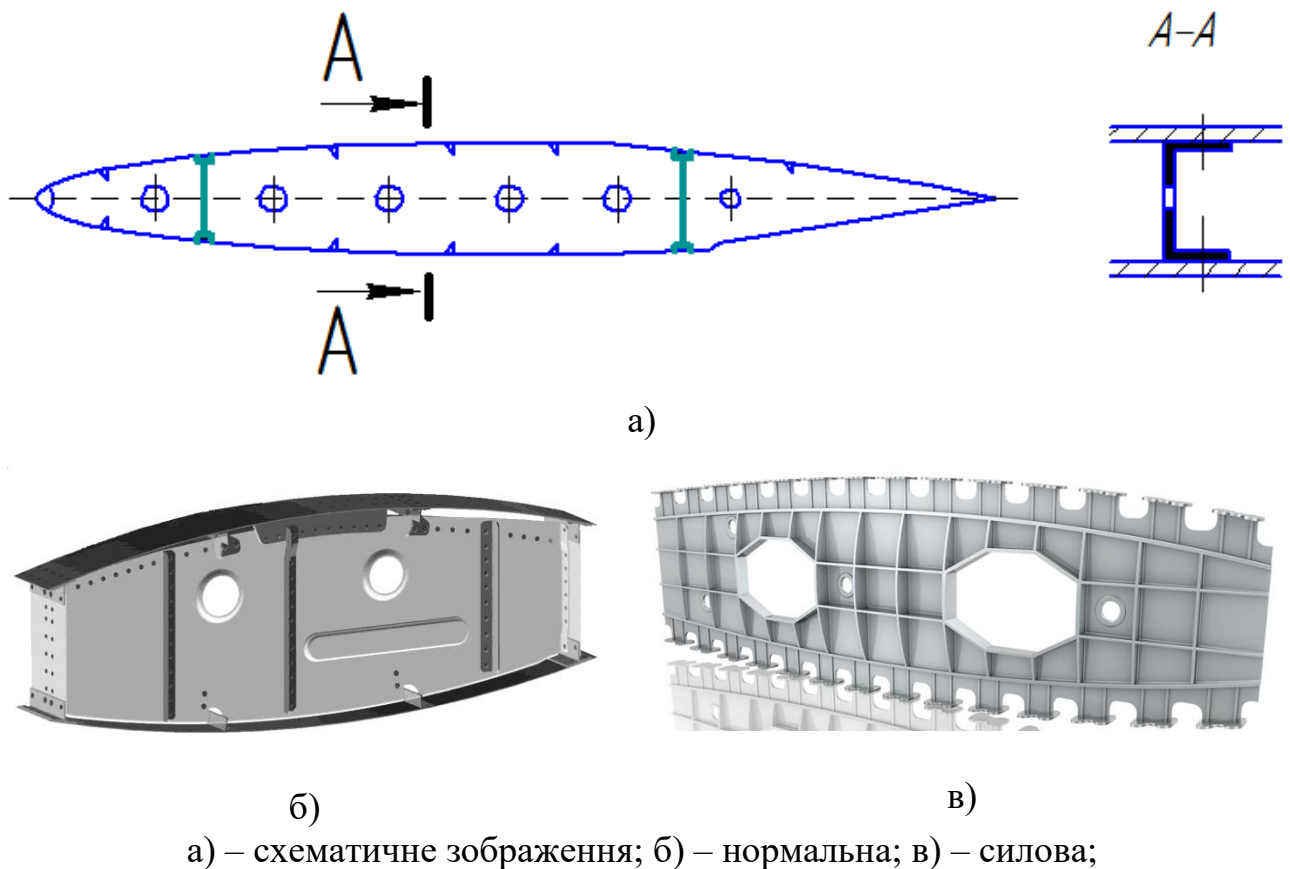
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ КЕСОННОГО КРИЛА ТА МЕТОДІВ ЙОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1 Аналіз конструкції кесонного крила

Конструкція кесонного крила складається з поперечного і продольного силового набору та панелей обшивки, підкріплених стрингерами або гофром. До продольного набору відносять лонжерони та стрингери, до поперечного – нервюри [1].

Нервюра – поперечний елемент силового набору крила, задає і зберігає задану форму профілю крила, передає місцеве навантаження на лонжерони і обшивку. Нервюри бувають нормальні і силові. За конструктивною схемою нервюри поділяють на балочні, рамні, ферменні та ферменно-балочні [2].

Нервюри балочного типу (рисунок 1.1) виконуються у вигляді суцільних стінок та поясів. Стійкість стінок підвищують за рахунок прикріплення до стінок кутових профілів або за рахунок зикуювання [2].



а) – схематичне зображення; б) – нормальна; в) – силова;

Рисунок 1.1 – Нервюри балочного типу

Рамна нервюра (рисунок 1.2) складається з двох половин, не зв'язаних між собою. Кожна з половин працює як двопоясна балка з криволінійною віссю. Перевагою даного типу нервюр є краще використання внутрішнього об'єму, а недоліком висока маса в порівнянні з іншими [2].

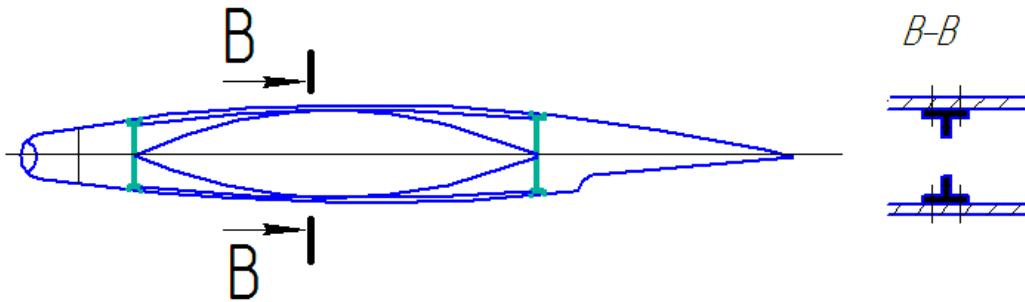


Рисунок 1.2 – Рамна нервюра

Ферменні нервюри (рисунок 1.3) використовують у крилах з великою товщиною аеродинамічного профіля і малим питомим навантаженням. Виготовляють штампуванням, зварюванням або приклепуванням поясів і розкосів [2].

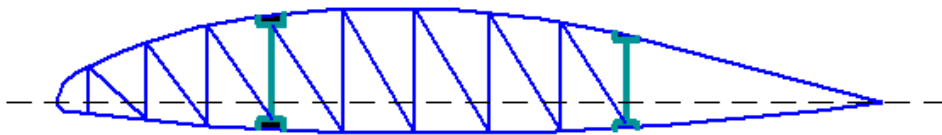


Рисунок 1.3 – Ферменна нервюра

Ферменно-балочні нервюри (рисунок 1.4) комбінують в собі балочну діафрагму, зазвичай, в носовій і хвостовій частині та ферменні стійки в центрі.

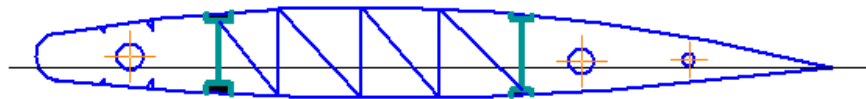


Рисунок 1.4 – Ферменно-балочна нервюра

Лонжерон – продольний елемент силового набору крила, у вигляді балки, яка складається з стінки, верхнього та нижнього поясів. Лонжерони можуть бути монолітними та збірними [2].

Монолітні лонжерони (рисунок 1.5) виготовляються з ціЛЬНОметалевої заготовки, шляхом механічної обробки фрезеруванням, гарячим штампуванням або методом прокатки. Монолітні лонжерони можуть виготовлятися з композитних матеріалів. В такому разі профіль лонжерону формується одразу, на етапі вкладання шарів матеріалу [1].

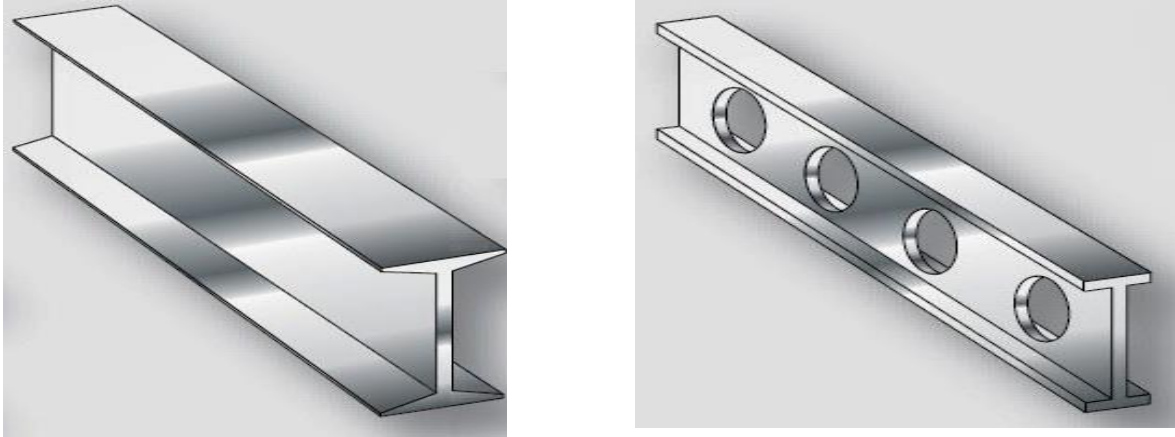


Рисунок 1.5 – Монолітні лонжерони

Збірні лонжерони (рисунок 1.6) складаються з окремих складових частин стінки (стінок) та верхнього і нижнього поясів, які з'єднуються між собою за допомогою заклепкових чи болтових з'єднань або заварювання [1].

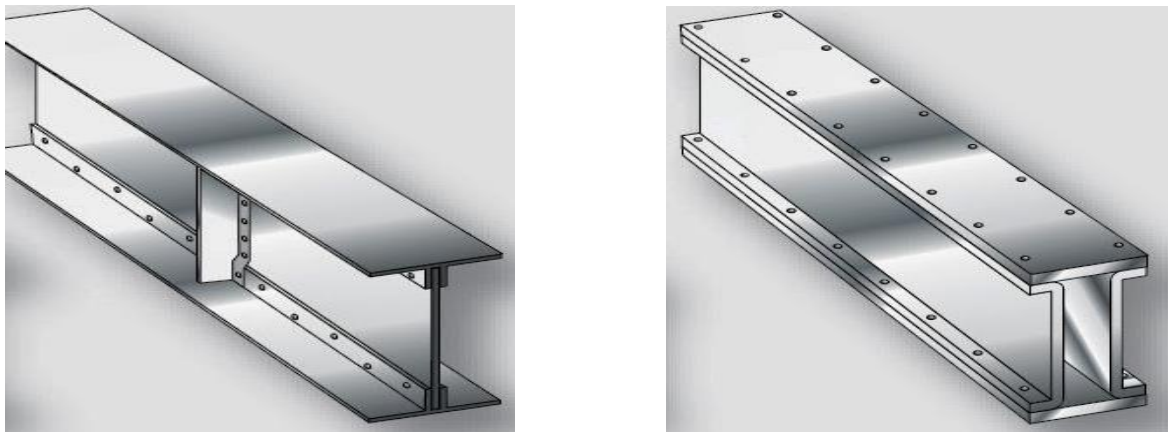


Рисунок 1.6 – Збірні лонжерони

Обшивка кріпиться до продольного і поперечного силовим наборам конструкції і утворює аеродинамічну поверхню. Обшивка сприймає аеродинамічне навантаження, а також нормальне навантаження від загального згину і дотичні навантаження від кручення крила [1].

Обшивка підкріплюється стрингерами за допомогою клепаання і утворює панелі. Також використовують монолітні панелі. Характерною ознакою монолітних панелей є створення у процесі виробництва конструкції, де обшивка та ребра жорсткості складають одне ціле. Монолітні панелі виготовляють гарячим пресуванням або гарячим вальцюванням. Конструктивно монолітні панелі мають низку переваг в порівнянні з збірними. Але вони менш технологічні та мають вищу трудомісткість [2].

1.2 Аналіз технологій виготовлення конструктивно-силових елементів крила

1.2.1 Технології виготовлення монолітних деталей крила

Монолітні деталі мають ряд переваг перед збірними:

- менша маса крила внаслідок зменшення кількості деталей, швів, підвищення руйнівних напружень, застосування панелей, що мають змінну товщину за хордою та вздовж розмаху крила;
- поліпшена якість поверхні крила;
- спрощена технологія складання.

Фрезеруванням виготовляють монолітні нервюри (рисунок 1.7), лонжерони та панелі обшивки. Суть процесу фрезерування полягає в обробці матеріалу, шляхом видалення матеріалу з заготовки для створення деталі фрезами. На сучасних авіабудівних підприємствах використовують фрезерувальні установки з числово-програмним управлінням (ЧПУ). Вони використовуючи 3D-модель деталі, виконаної за допомогою систем автоматизованого проектування (САПР), самостійно фрезерують деталь. В такому разі оператор установки виконує тільки контролюючу функцію.

Переваги фрезерування:

- можливість виготовлення великої кількості деталей різних геометричних форм, використовуючи одну фрезерувальний станок;
- обробка виконується згідно 3D-моделі деталі, що дозволяє забезпечити високу точність і задану шорсткість поверхні;

- низька трудомісткість виготовлення деталей.
- відсутність в необхідності великої кількості робітників, один оператор, може контролювати декілька станків.

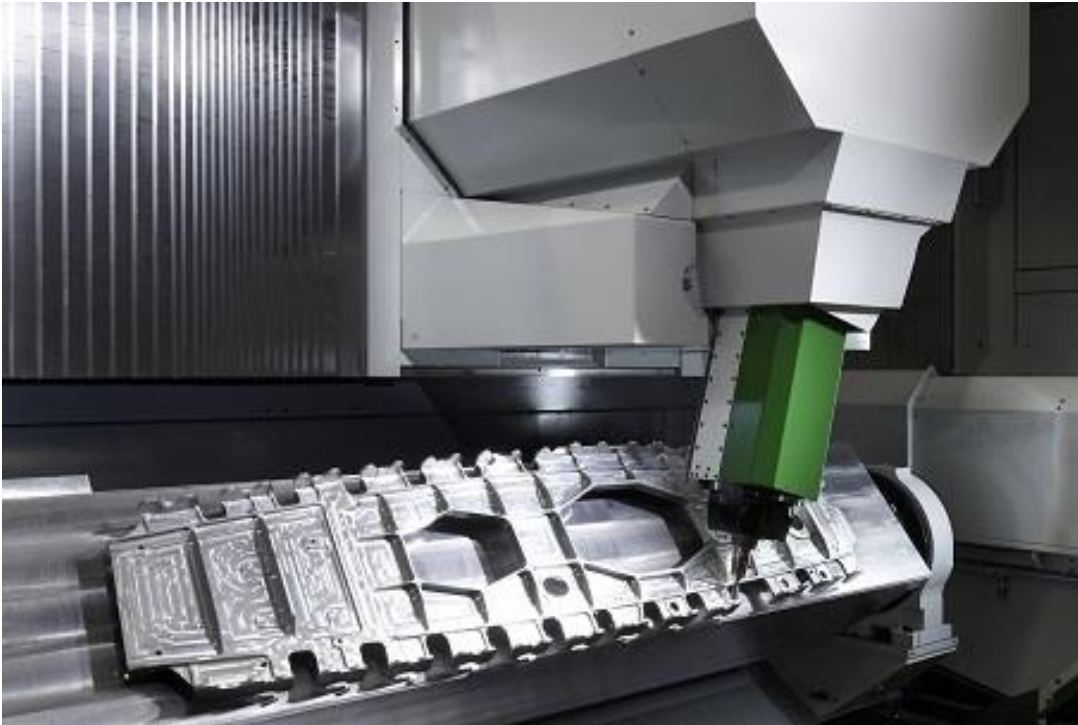


Рисунок 1.7 – Виготовлення монолітної нервюри фрезеруванням
Недоліки фрезерування:

- необхідність використання великої кількості різнотипного ріжучого інструменту (фрез) для обробки однієї деталі;
- труднощі в створенні деталей складних форм;
- має високий рівень відходів при обробці деталей;

Також для виготовлення монолітних деталей крила можна використовувати гаряче об'ємне штампування (рисунок 1.8).

Суть процесу гарячого штампування полягає в тому, що заготовку, нагріту до стану пластичності, вміщують у штамп і під дією тиску (при штампуванні у пресі) або ударами (на молоті) змушують її заповнити робочу порожнину штампу, що має форму деталі, яку виготовляють [3].

Перевагами гарячого штампування є [3]:

- вища міцність, в порівнянні з аналогічними деталями, виготовленими фрезеруванням;

- усі деталі, отримані в одному штампі, взаємозамінні у заданих допусках;
- продуктивність гарячого штампування в багато разів вища, ніж обробка фрезеруванням.
- менші витрати матеріалів.



Рисунок 1.8 – Штамповані нервюри

Недоліки гарячого штампування [3]:

- велика трудомісткість підготовки виробництва;
- великі габарити оснащення;
- необхідність використання великої кількості штампів;
- мала чистота поверхні;
- вигорання легируючих присадок із поверхневих шарів деталі.
- можливість виготовлення деталей тільки простих геометричних форм із повільними переходами від одних перетинів до інших.

Шляхом прокатки виготовляють монолітні лонжерони у вигляді швелеру та двотаврової балки.

Прокатка (вальцювання) – це процес формування деталі необхідної форми і розміру шляхом пропускання заготовки через валки прокатного станку. Шляхом прокату можна створювати деталі з постійним або змінним профілем по довжині. Швелер та двотавр відносять до фасонного прокату. Виготовляються вони методом гарячої прокатки. Також метод гарячого вальцювання дозволяє виготовляти монолітні обшивки [3].

Сутність гарячої прокатки полягає в тому, що заготовку перед тим як пропустити через валки розігрівають до температури вищої ніж температура рекристалізації металу. За рахунок чого структура металу ущільнюється, підвищується міцність та знімаються внутрішні напруження, зникають мікротріщини та пористості металу [3].

Переваги гарячого вальцювання [3]:

- низька собівартість;
- низький рівень відходів виробництва;
- можливість створювати деталі з змінним профілем;
- висока міцність готових деталей;
- усуваються дефекти лиття;
- можливість автоматизації виробництва;

Недоліки гарячого вальцювання [3]:

- низька якість поверхні деталі;
- відносно невисока точність;
- можливі залишкові напруження при вальцюванні деталей з змінним профілем, через нерівномірність охолодження;
- необхідність пост-обробки.

1.2.2 Технології виготовлення збірних деталей крила

Збірні деталі крила виготовляють з готових профілів методом приєднання складових частин заклепковими, болтовими з'єднаннями або зварюванням.

Складання виконується в спеціальних стапелях, в яких жорстко закріплюються всіх складові частини для дотримання точного позиціонування.

Технології заклепкових і болтових з'єднань передбачають в собі виконання отворів необхідної точності для постановки в них кріпильних елементів, з подальшим виконанням з'єднань. Заклепкові з'єднання можуть виконуватись пресовим, ударним методом або методом тиску з розкочуванням. Основними критеріями заклепкових з'єднань є необхідність враховувати електролітичність пари кріпильний елемент - деталь, а також матеріал заклепки повинен бути пластичнішим за матеріали з'єднуваних деталей [4].

Є три групи матеріалів заклепок, які використовуються в авіаційній галузі:

- 1) алюмінієві сплави (В95, Д18, АМг5П, АМц, Д19П, АД1);
- 2) титанові сплави (ВТ16);
- 3) сталь (20Г2).

Болтові з'єднання виконуються болтом і гайкою (для підвищення площі контакту кріпильної системи і з'єднуваних деталей можуть використовуватись шайби). Болти можуть встановлюватись в отвори з зазором або з натягом. При виконанні болтових з'єднань, аналогічно заклепковим, необхідно враховувати електролітичність пари кріпильний елемент – деталь. Також необхідно точно розраховувати зусилля затягування в болтовому з'єднанні, для дотримання надійного складання та не пошкодити деталі, які з'єднують [4].

Якщо болтове з'єднання розташоване вертикально, то болт необхідно встановлювати головкою доверху (крім випадків, коли це конструктивно неможливо), для запобігання повного руйнування з'єднання, в разі розгвинчування гайки. Щоб запобігти розгвинчування гайки використовують контрування. Контрують болтові з'єднання за допомогою проволочи (використовуються гайки з отворами на гранях), шплінта (в такому разі використовується корончата гайка та болт з отвором в різьбовій частині), кернуванням, також використовують фіксатор різьби або спеціальні самоконтруючі гайки [4].

Матеріали болтів і гайок:

- 1) Вуглеводні конструкційні сталі (Сталь 45, Сталь 40);
- 2) Конструкційні леговані сталі (30ХГСА);
- 3) Конструкційні леговані високоміцні сталі (30ХГСН2МА);
- 4) Нержавіючі сталі;
- 5) Титанові сплави.

Переваги заклепкових і болтових з'єднань:

- Простота виконання з'єднань;
- Простота контролю виконаних з'єднань;
- Отвори під кріпильні елементи являються обмежувачами тріщин.

Перевагами болтових з'єднань перед заклепковими є можливість контролювати зусилля затягування з'єднання, можливість виконання різних з'єднань, можливість виконувати посадку з натягом, яка підвищує міцність отворів.

Недоліки заклепкових і болтових з'єднань [4]:

- Збільшення маси за рахунок використання великої кількості кріпильних елементів;
- Необхідність герметизації з'єднань;
- Заклепкові і болтові з'єднання працюють тільки на зріз;
- Необхідність враховувати електролітичність пари «кріпильний елемент - деталь»;
- Висока трудомісткість робіт.

Зварювання – це процес отримання нерознімних з'єднань шляхом встановлення міжатомних зв'язків між частинами, які зварюються, при місцевому або загальному нагріві, пластичній деформації або спільній дії нагріву та деформації [3].

Всі види зварювання, які використовують в літакобудуванні можна розділити на зварювання плавленням (напівавтоматичне і автоматичне зварювання під флюсом, аргоно-дугове, імпульсно-дугове, плазмове,

електронно-променевого та лазерного) і зварювання тиском (точкове, роликове та стикове) [3].

Переваги використання зварювання:

- зниження маси конструкції за рахунок виключення кріпильних елементів та необхідності в герметизації;
- зниження трудомісткості складання;
- висока міцність з'єднань;
- високий коефіцієнт використання матеріалів;
- висока якість поверхні при контактному зварюванні;

Недоліки використання зварювання:

- зварний шов погано сприймає ударні і вібраційні навантаження.
- необхідність у термообробці для зняття внутрішніх напружень в зварному шві;
- зниження міцності металу в зоні зварювання.
- проведення антикорозійної обробки або гальванізації можливе тільки після зварювання.

1.2.3 Технології виготовлення деталей крила з композитних матеріалів

Композитні матеріали складаються з двох або більше нерозчинних один в одному компонентів – матриці та наповнювача. Матриця в композиті виконує функцію зв'язуючого матеріалу в якому розподілений наповнювач, який виконує функцію армуючого матеріалу. Матриця забезпечує спільну роботу окремих волокон наповнювача. Наповнювач сприймає основні напруження, що виникають під зовнішніми навантаженнями, він надає жорсткості і міцності у напрямку орієнтування волокон [5].

Композитні матеріали поділяють за типом матриці:

- 1) полімерні (ПКМ);
- 2) металеві (МКМ);

- 3) керамічні (ККМ);
- 4) вуглець-вуглецеві (ВВКМ).

Для виготовлення деталей крила найбільш поширені полімерні композиційні матеріали, а саме вуглепластики, склопластики та боропластики.

В якості матриці використовують епоксидні, поліефірні та епоксівінілефірні смоли.

Переваги композиційних матеріалів [5]:

- висока питома міцність;
- висока жорсткість;
- висока втомна міцність;
- низька маса.

Недоліки композиційних матеріалів [5]:

- висока вартість виробництва;
- складність виробництва;
- низька ударна в'язкість;
- анізотропія матеріалу – залежність від напрямку укладки волокон;
- токсичність;
- низька експлуатаційна технологічність (низький рівень контролепридатності та ремонтпридатності).

Існують наступні типи процесів виготовлення деталей з композитних матеріалів:

1) відкрите формування:

- ручне вкладання матеріалу;
- розпилення суміші смоли з подрібненим наповнювачем;
- обмотування нитками;
- вкладання стрічки;

2) закрите формування;

- формування в вакуумних пакетах;
- обробка вакуумною інфузією;

- рідке формування (трансферне формування смоли);
- компресійне формування;
- пултрузія;
- лиття під тиском з підсиленою реакцією;
- відцентрове лиття;
- безперервне ламінування;

3) лиття полімеру.

Для виробництва нервюр, стрингерів та панелей обшивки крила з композиційних матеріалів можна використовувати методи закритого формування, а саме методами вакуумної інфузії, трансферним формуванням смоли та компресійного формування.

Метод вакуумної інфузії (рисунок 1.9) – метод закритого формування, в якому використовується вакуумний тиск для просочення смолою наповнювача. Наповнювач у вигляді полотен вкладається у форму в сухому вигляді, після чого створюється вакуум і сухий наповнювач ущільнюється перед нанесенням смоли. Після досягнення повного вакууму смола вводиться в наповнювач через трубки, так як наповнювач ущільнений, місця для надлишку смоли немає, це забезпечує високий коефіцієнт використання матеріалу [5]. За допомогою даного методу виготовляють нервюри крил літаків МС-21.

Переваги методу вакуумної інфузії:

- низький рівень відходів смоли;
- мінімальні викиди токсинів;
- мінімізація утворення пор в готовій деталі;
- можливість формування деталей різних розмірів і форм.

Окрім основних недоліків композиційних матеріалів метод вакуумної інфузії має наступні:

- необхідність великої кількості форм для виробництва різних деталей.
- необхідність чіткого контролю правильності вкладання наповнювача;

- необхідність чіткого прорахунку місць встановлення трубок, для рівномірної подачі смоли;
- неможливо створювати деталі зі складною формою.

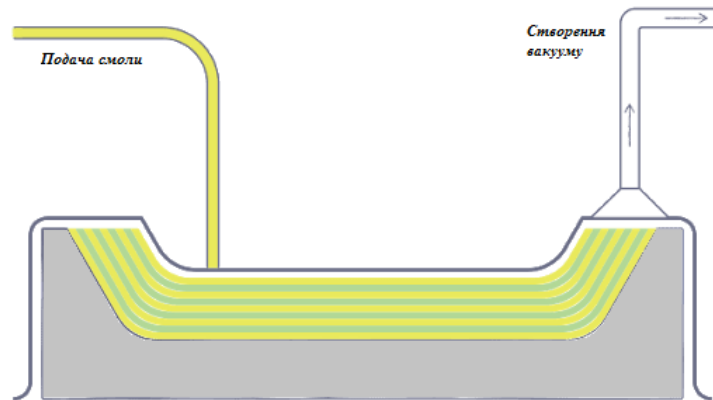


Рисунок 1.9 – Метод вакуумної інфузії

Рідке формування (рисунок 1.10) – це процес об'ємного формування, в якому смола вводиться в порожнину форми під тиском. Цей процес дозволяє отримати деталі складних форм. Наповнювач у вигляді полотен вкладається у форму в сухому вигляді, товщина деталі визначається порожниною оснастки.

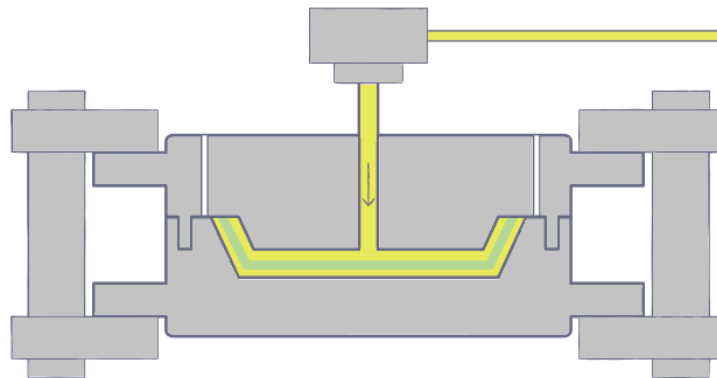


Рисунок 1.10 – Рідке формування (трансферне формування смолою)

Метод рідкого формування поєднує в собі аналогічні переваги та недоліки методу вакуумної інфузії, але дозволяє створювати деталі більш складних форм. Також недоліком даного методу є необхідність використання пресу, що ускладнює та підвищує вартість виробництва [5].

Компресійне формування (рисунок 1.11) – це метод закритого формування, при якому попередньо просочений смолою наповнювач (препрег),

вкладається в відкриту нагріту порожнину форми, після чого накривається верхньою частиною з прикладенням тиску, для щільного контакту матеріалу з усією формою. Температура та тиск підтримуються до тих пір, поки препрег не затвердіє.

Основними перевагами даного методу є:

- швидкість процесу формування;
- висока якість поверхонь;
- відсутність операцій просочування матеріалу смолою

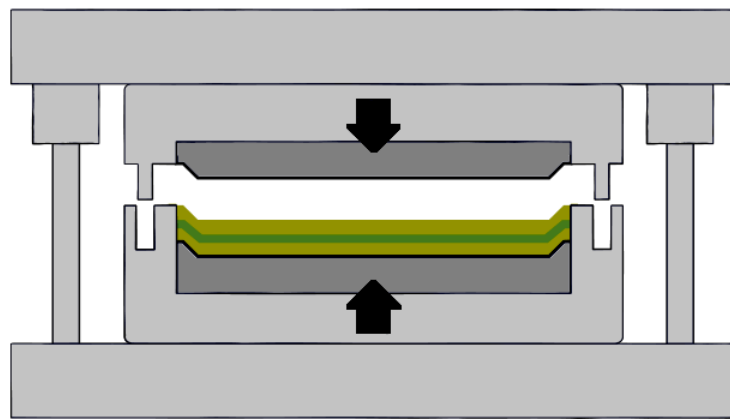


Рисунок 1.11 – Компресійне формування

До недоліків можна віднести:

- якість деталей напряму залежить від якості препрегів;
- необхідність великої кількості форм для виробництва різних деталей.

Лонжерони найчастіше виготовляють двома методами: автоматичним вкладанням стрічки (automatic tape laying – ATL) та обмотуванням нитками (automated fiber placement – AFP). Дані технології також застосовуються для виготовлення панелей обшивки крила та стрингерів.

Сутність технології автоматичного вкладання стрічки ATL в тому, що спеціальне обладнання, яке оснащено числово-програмним управлінням укладає наповнювач у вигляді суцільних смуг тканини просочених смолою. Ці стрічки намотані на котушку, яка інтегрується в оснащення. Смуги використовують у вигляді препрегів. Пристрій подачі витягає стрічку з котушки і розміщує її на робочу платформу або напівфабрикат в необхідному

положенні, відрізає спеціальним різаком та ущільнює її. Пристрій може змінювати напрямок орієнтації волокон в процесі укладки [5]. Пристрій подачі може розміщуватись на кінці шарнірного роботу (рисунок 1.12, а), який переміщується навколо оправки, на яку наноситься матеріал, або може бути розміщений на порталі(рисунок 1.12, б).



а)



б)

а) – роботизована рука; б) – порталного типу;

Рисунок 1.12 – Оснащення для автоматичного вкладання стрічки

Стрічку укладають на оправку в один ряд будь-якої довжини та під будь-яким кутом. Довжина і кут укладання стрічок контролюється за допомогою ЧПУ згідно 3D моделі.

Перевагами даного методу є:

- точність укладки завдяки ЧПУ;
- можливість виготовлення габаритних деталей;
- можливість укладки волокон будь-якої довжини та під будь-яким кутом.
- висока якість поверхні;
- можливість виконувати місцеві потовщення для створення посилень конструкції (наприклад в місцях кріплення двигуна, елементів керування літаком та механізації крила);

Недоліки технології автоматичного вкладання стрічки:

- дороговизна обладнання;
- дороговизна препрегів;
- складність проектування деталей та технологічних процесів для використання технології;
- можливість утворення пустот.

Дана технологія успішно застосовується у виробництві лонжеронів крил літаків Airbus A400M, Boeing 787. Та панелей обшивки крила літаків Airbus A350, Airbus A400M та інших.

Метод обмотуванням нитками AFP (рисунок 1.13) схожий на метод ATL. Істотною відмінністю є те, що дана технологія дозволяє створювати деталі з більш складною геометрією. Це пов'язано з тим, що замість широких стрічок, як у AFP, станок укладає вузькі джгутів препрегу, які можна направляти по різко вигнутим поверхням. В AFP деяка кількість джгутів препрегу потрапляє в укладочні головки, які укладають їх в безперервний шар. Головка може бути встановлена, аналогічно з обладнанням ATL, на шарнірному роботі, який переміщується навколо оправки, або на порталі. Також в якості альтернативи,

головка може розміщуватись статично, а оправка рухатись навколо неї. Також можлива варіація коли головка і оправка рухаються одночасно. Препрег перед укладкою підігрівається для кращого закріплення шарів [5].

Обладнання AFP (рисунок 1.14) проводить операції ущільнення з заданим програмно зусиллям та проводить відрізання джутів.



Рисунок 1.13 – Метод обмотуванням нитками AFP

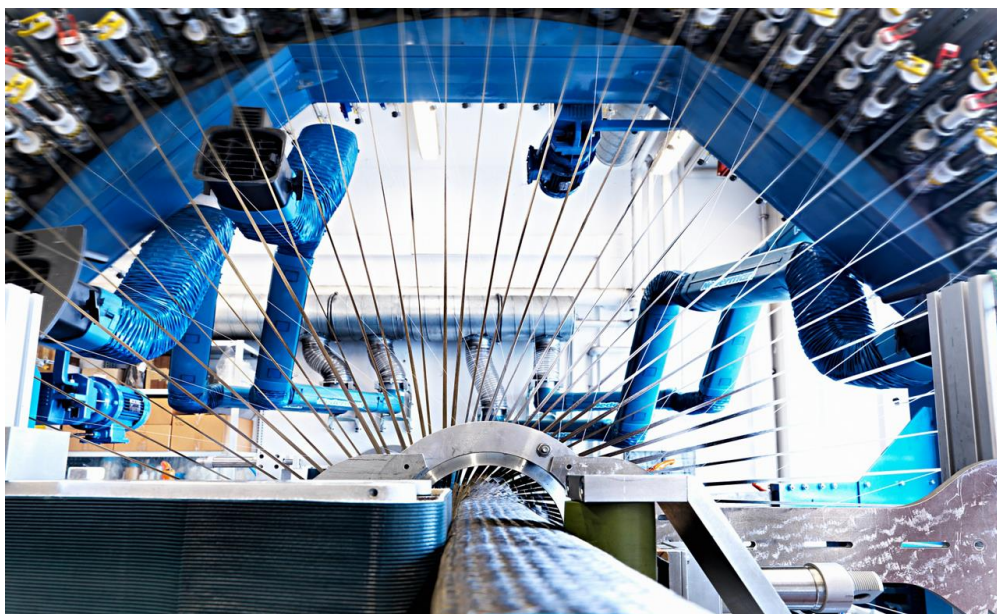


Рисунок 1.14 – Обладнання AFP

Метод обмотуванням нитками поєднує в собі плюси та мінуси технології ATL, але перевагою є можливість виготовлення деталей з більш складною геометричною формою. Недоліком є більша вартість обладнання у порівнянні з оснащенням ATL.

Метод AFP успішно застосовується у виробництві лонжеронів крил літаків Airbus A350, MC-21. Стрингерів крил Airbus A350, Boeing 777X, Boeing 787, MC-21 та панелей обшивки крила літаків KAI KF-X, MC-21.

1.3 Аналіз технологій остаточного складання консолей та центроплану крила

Для кесонного крила застосовують технологію панельного складання. Суть панельного складання полягає в тому, що крило у процесі виробництва розділяють на декілька технологічних панелей, які у визначеній послідовності складають у остаточну конструкцію [1].

Кожну технологічну панель виготовляють незалежно від інших у спеціальному стапелі. По-перше, обшивці надають визначеної форми, яка відповідає аеродинамічному профілю крила, прикріплюють до неї стрингери. Окремо складають збірні нервюри та лонжерони [1].

На стапель складання крила (рисунок 1.15) встановлюють лонжерони та нервюри, в яких по направляючим отворах виконують, співвісні отвори з заданим рівнем точності під кріпильні елементи, а потім виконують з'єднання. Далі встановлюють і фіксують по рубильникам оснащення панелі крила, по направляючим виконують співвісні отвори в панелях, полках нервюр та поясах лонжеронів, проводять операції зенкування та виконують заклепкові з'єднання. Під час виконання з'єднань проводиться їх герметизація. Паралельно з процесом остаточного складання консольних частин крила та центроплану проводиться монтаж систем, які знаходяться в кесоні (трубопроводи, насоси, електропроводка та інше). Згодом зібраний кесон демонтують зі стапеля і монтують на нього вузли, які неможливо встановити на стапелі [3].

Зібраний кесон на спеціальних стендах перевіряють на якість виконання з'єднань, герметичність та якість зовнішніх контурів крила [3].

Технологія може відрізнитись послідовністю монтажу вузлів та рівнями механізації та автоматизації.

Недоліком панельного складання є велика кількість з'єднаних деталей і за рахунок цього збільшення маси конструкції.



Рисунок 1.15 – Стапель складання крила

Позитивною рисою панельного складання є те, що поверхня крила має високу якість і точно відповідає аеродинамічній формі крила, бо каркас у процесі складання орієнтований на обшивку. Крім того полегшується процес монтажу різноманітних провідок та забезпечується широке застосування відкритого машинного клепання [1].

1.4 Аналіз технологій стикування консолей крила з центропланом

Кесон консольної частини крила з'єднують з центропланом за допомогою моментних вузлів на лонжеронах і контурного вузла, який з'єднує панелі та стінки кесона консолі крила з центропланом. Складання виконується болтовими з'єднаннями з певним зусиллям затягування. Контур стику герметизується [3].

Стикування виконується за допомогою спеціального станду-позиціонера, на якому розміщують консоль крила [3].

Базування консолі на стенді може виконуватись:

- по площині – консоль розміщується на ложементах станду;
- за допомогою спеціальних такелажних вузлів, які приєднуються до консолі через технологічні отвори.

Для одиничного або дрібносерійного виробництва використовують ручні стикувальні стенди. Стенд з консоллю підводиться до центроплану робітниками вручну, або за допомогою дистанційного керування, стенд має рухомі каретки за допомогою яких консоль позиціонують відносно центроплану. Перевагами даного станду є можливість використання для стикування консолей різних літаків, змінюючи ложементи або уніфікація такелажних кріплень та дешевизна обладнання [3].

Серед недоліків можна виділити:

- низьку точність позиціювання;
- високу трудомісткість стикувальних робіт;
- необхідність участі в стикуванні великої кількості робітників;
- можливість пошкодження частин літака оснащенням.

Для стикування крил сучасних літаків у середньо- та багатосерійних виробництвах використовують стаціонарні позиціонери (рисунок 1.16), які в є частиною складальної лінії та мобільні стенди (рисунок 1.17).

В стаціонарних стендах консолі позиціонуються за допомогою зворотнього зв'язку лазерного трекеру. Комп'ютер з спеціальним ПЗ автоматизують виміри лазерного трекеру, на основі цих вимірів дають сигнали безпосередньо на позиційну установку, яка переміщує консоль. Також передбачена функція ручного керування за допомогою джойстика. Система лазерного вимірювання в режимі ручного керування вказує оператору напрямок позиціювання, а також попереджає оператора про зближення консолі з частинами літака та в разі необхідності зупиняє рух для запобігання зіткнень.



a)



б)

a) – Electroimpact Global 7000/8000; б) – Broetje Automation FLAC
Рисунок 1.16– Стационарні стенди для стикування консолей крила з центропланом

Приклад мобільного стенду для стикування крила є стенд на платформі OmniMove (рисунок 1.17) — це транспортувальна платформа виробництва фірми KUKA. Платформа може рухатися автономно, або керуватися оператором за допомогою дистанційного керування. Платформа універсальна, тому може широко використовуватись, як в багатосерійному виробництві, так і дрібносерійному або одиничному [6].



Рисунок 1.17 – платформа omniMove

OmniMove має можливість приєднання декількох платформ, в максимальній версії може переміщувати вантажі до 90 тон і 30 метрів в довжину. Виробник може змінювати розміри платформи відповідно до потреб замовника [6].

Принцип руху платформи заснований на колесі Ілона, що забезпечує можливість все направлено руху omniMove. Колеса з окремими бочкоподібними роликками можуть переміщуватися незалежно один від одного. Це дозволяє omniMove рухатися по прямій в усі боки та обертатися на місці [6].

Платформа оснащується системою оптичного керування. Для цього на центральній лінії платформи встановлюються чотири камери, дві з яких розраховані на повздовжній напрям, а дві на бічний [6].

Платформа рухається по розмітці нанесеній на підлозі. Позиції зупинки і команди для руху в бік виявляються за допомогою додаткових позначень, які розміщують поруч з напрямним маркуванням. Команда ж руху, зупинка і

визначення швидкості, задається оператором, який супроводжує платформу з пультом дистанційного керування [6].

Для центрування засобів кріплення корисного навантаження до підйомних пристроїв, останні оснащені засобами центрування CupCone, виконаних у вигляді зрізаного конуса. Точність центрування до 0,1 мм [6].

OmniMove може додатково оснащуватися різними типами програмного забезпечення KUKA Navigation.Solution:

- FreeNav — вільна навігація і уникнення перешкод.

Опція дозволяє платформі визначити свою власну траєкторію руху.

- FineLocPos — високоточне позиціонування.

Точність позиціонування збільшується до 1 мм.

- ObjectTrack

Опція дозволяє виявлення об'єктів на основі систем автоматичного проектування, визначення відносного розташування до виявленого об'єкту, відстеження напрямку для забирання вантажу [6].

Висновки до розділу 1

У даному розділі проведено аналіз конструкції кесонного крила в цілому та його окремих силових елементів. Конструкція кесонного крила складається з поперечного і продольного силового набору та панелей обшивки, підкріплених стрингерами або гофром. До продольного набору відносять лонжерони та стрингери, до поперечного – нервюри.

Проведено аналіз методів виготовлення монолітних та збірних елементів силового набору крила, методів виготовлення їх з композиційних матеріалів, а також технології остаточного складання крила та стикування консольних частин з центропланом.

Зроблено висновок про широкий вибір технологій для виробництва лонжеронів, стрингерів, обшивок крила, його остаточного складання та стикування консольних частин до центроплану, які можуть задовольнити потреби авіабудівних підприємств відповідно до об'ємів випуску, розмірів деталей та бюджету виробництва.

Винятком являються як металічні, так і композитні нервюри крила. Через складність геометричних форм та жорстких вимог, які пред'являються до точності їх виготовлення.

Всі описані технології виготовлення металічних нервюр відносяться до субтрактивного виробництва і не задовольняють всіх вимог авіабудівних підприємств, тому прийнято рішення оптимізації їх виробництва шляхом впровадження адитивного виробництва. Адитивне виробництво дозволить виготовляти нервюри різних розмірів і типу без використання великої кількості обладнання, з мінімальним рівнем відходів від виробництва. Також за допомогою адитивної технології можна знизити масу деталей при збереженні їх міцності.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ НЕРВЮРИ ФРЕЗЕРУВАННЯМ

2.1 Аналіз та створення 3D-моделі монолітної нервюри крила літака

Для розрахунків та оптимізації була обрана третя нервюра крила літаків типу Ан-148, Ан-158 та Ан-178. Це сімейство літаків державного підприємства «Антонов». Ан-148 та Ан-158 – регіональні літаки, призначені для перевезення до 80 пасажирів (Ан-148) та до 102 пасажирів (Ан-158), багажу, пошти та вантажів на внутрішніх і міжнародних лініях з можливістю експлуатації на аеродромах зі штучним покриттям, які розташовані на висотах до 1500 метрів над рівнем моря. Ан-178 – близько магістральний транспортний літак, розроблений на базі пасажирських Ан-148/158, з вантажопідйомністю 15-18 тон, що дорівнює двом стандартним морським контейнерам [7].

Третя нервюра крила знаходиться у консольній частині в зоні стикового профілю з центропланом. У зв'язку з цим, нервюра являється силовою і має монолітну конструкцію. За допомогою САПР «Компас-3D» створена 3D-модель третьої бортової нервюри крила літаків сімейства Ан-148/158/178 [8] (рисунок 2.1).

Конструктивно нервюра – монолітна, балочного типу і виконана у вигляді суцільних стінки та поясів, виготовлена з цільної алюмінієвої заготовки у формі плити шляхом фрезерування [8].

На сторонах стінки вифрезеровані по 13 стійок з обох сторін, які виконують функцію ребер жорсткості. До верхнього і нижнього поясів нервюри кріплять панелі обшивки, тому вони мають геометричну форму, яка повністю повторює аеродинамічний профіль крила. Аеродинамічне компонування крила – К19А, основою якого є надкритичний аеродинамічний профіль П-68а, який розроблений на ДП «Антонов». На верхньому та нижньому поясах виконано по 86 отворів діаметром 6 мм для заклепкових з'єднань їх з панелями обшивки крила. Передній і задній пояси служать для з'єднання нервюри з переднім і заднім лонжеронами відповідно. На передньому поясі виконано 22 отвори діаметром 5 мм, на задньому – 18 отворів діаметром 5 мм [8].

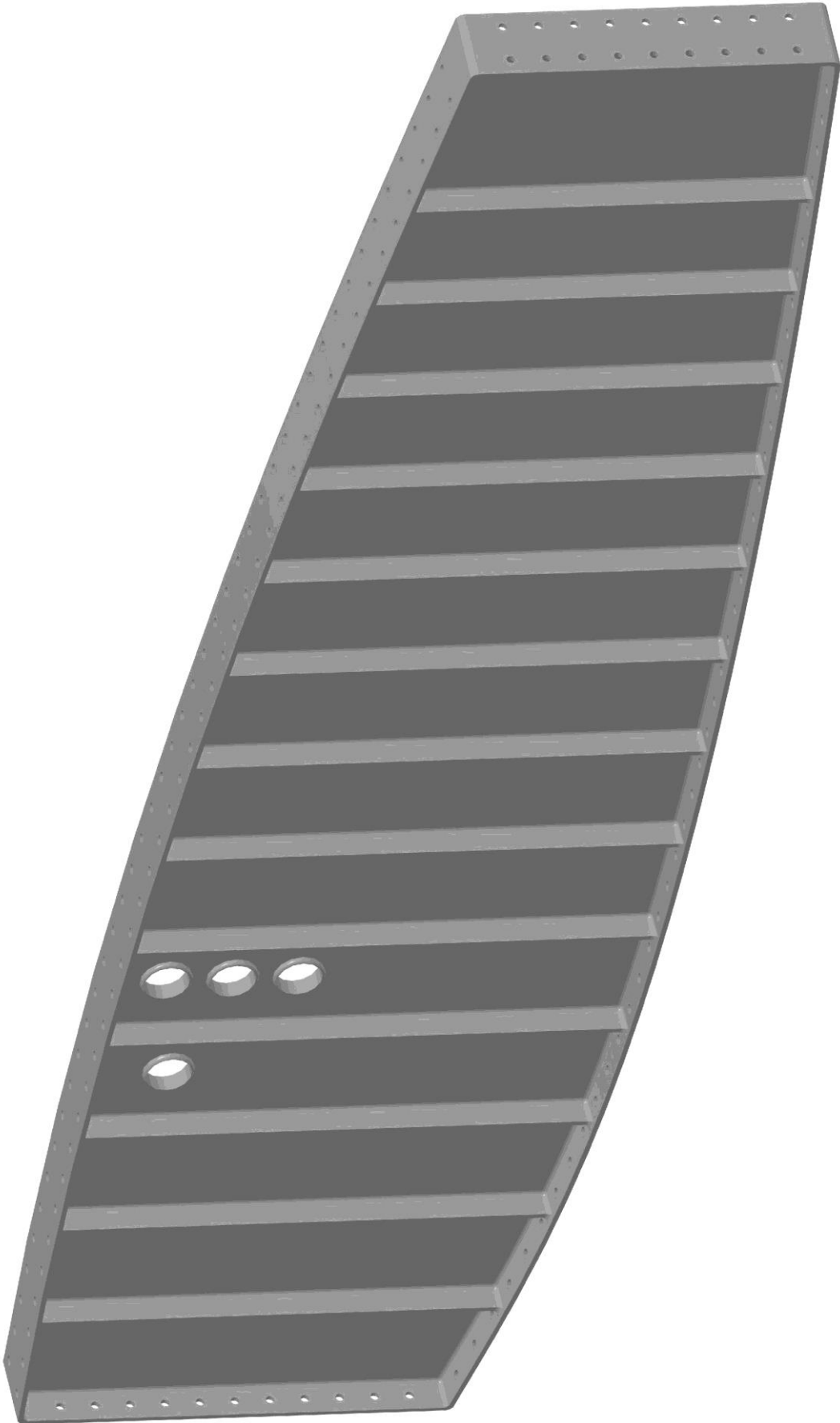


Рисунок 2.1 – Модель монолітної силової нервюри крила

На стінці виконані чотири технологічні отвори діаметром 26 мм, одне між 3 та 4 та три між 4 і 5 ребрами жорсткості. Технологічні отвори служать прокладення трубопроводів та джгутів електричної проводки [8].

Всі внутрішні грані мають скруглення діаметром 3 мм. Необхідність виконання скруглень пояснюється появою концентрацій на межах стику окремих частин деталі (пояси зі стінкою, стінка з ребрами жорсткості, пояси з ребрами жорсткості, тощо), а також технологічним обмеженням при використанні ріжучого інструменту – фрез.

Нервюра виготовлена з алюмінієвого сплаву Д16Т. До складу сплаву входять: Алюміній (до 94,7 %), мідь (до 4,9%), магній (до 1,8%), марганець (до 0,9%), кремній (до 0,5 %), залізо (до 0,5 %), а також домішки інших металів (не більше 0,15%). Наявність даних компонентів підвищує корозійну стійкість і механічну міцність сплаву [9].

В таблиці 2.1 наведені фізичні та механічні властивості алюмінієвого сплаву Д16Т, який випускається у формі плит.

Таблиця 2.1 – Фізичні та механічні властивості Д16Т

Властивість	Значення
Модуль пружності, E	$0,72 \cdot 10^5$ МПа
Коефіцієнт теплопровідності, λ	130 Вт/(м·°C)
Щільність, ρ	2800 кг/м ³
Питома теплоємність, C	0,922 Дж/(кг·°C)
Межа міцності, σ_b	420 МПа
Межа пропорційності (текучості), σ_T	275 МПа
Відносне подовження, δ_5	5 %
Твердість по Бринелю, HB	105 МПа

Для виробництва даної нервюри необхідний фрезерний станок з ЧПУ. Він відрізняється від механічних застарілих станків наявністю електронних зв'язком з комп'ютером. За рух шпиндельної головки, рух базового столу та інші функції обладнання відповідає програма керування, яка закладено в

процесор станку. В неї закладається повна цифрова 3D модель деталі, яка поділена на точні координати, вказаний матеріал, параметри фрези, шлях її переміщення та інші аспекти, які необхідні для процесу фрезерування. Задачі оператора, який працює за станком з ЧПУ зводяться до: запуску обладнання, закріплення заготовки на робочій поверхні, зміни необхідних фрез, настроювання параметрів обладнання через панель керування, таких як режим швидкості та потужність обробки. А також контроль за виконанням фрезерування в процесі роботи обладнання.

В зв'язку з наявністю безлічі округлень різних діаметрів, точних криволінійних поверхонь та необхідності виконання великої кількості отворів, а також необхідності оброблювати заготовку з усіх сторін доцільно використовувати обробляючий центр з ЧПУ.

Він представляє собою багатофункціональний комплекс з програмною системою керування. Центр оснащений одним або декількома рухомими базовими столами та системою зміни інструменту. Комплекс має широкі технологічні можливості завдяки поворотному столу, великому набору інструментів і значному діапазону зміни частот обертання шпинделя і швидкостей подач. Вони дозволяють виготовляти вироби з високим темпом, за рахунок скорочення часу на переміщення деталі між станками, які пристосовані для різних технологічних етапів.

Основою комплексу є несуча станина з високоміцної сталі, яка забезпечує достатній рівень жорсткості та стійкості, для мінімізації впливу вібрацій на процес обробки. На станині закріплені один або декілька робочих столів, які оснащені поворотним механізмом і призначені для розміщення і закріплення на них заготовки. Також на станині розміщується консоль, яка є основою всього інструментального комплексу обробляючого центру з ЧПУ. Консоль рухається на робочим столом в горизонтальному напрямі, а встановлений на консолі супорт може додатково виконувати поперечні нахили, забезпечуючи можливість п'яти координатної обробки заготовок. Потужний шпиндель з високою частотою обертів дає можливість обробляти широкий спектр

матеріалів. Магазин для набору ріжучих інструментів і механізм їх автоматичної зміни дозволяють знизити трудомісткість завдяки автоматизованому швидкому вибору необхідного ріжучого інструменту.

Комплекси оснащуються розподіленою картриджною системою змащення, що дозволяє забезпечувати дозовану подачу мастила в необхідні вузли і пари тертя. Також до переліку оснащення входить система подачі змащувально-охолоджувальної рідини.

Фрезерні центри дозволяють виконувати п'яти координатну фрезерну обробку деталей, виконувати округлення, а також виконувати отвори.

Світовий ринок виробників обробляючих станків з ЧПУ (рисунок 2.2) дуже широкий. Серед найбільших країн-виробників: Китай (24,8%), Німеччина (15,8%), Японія (15,6%).

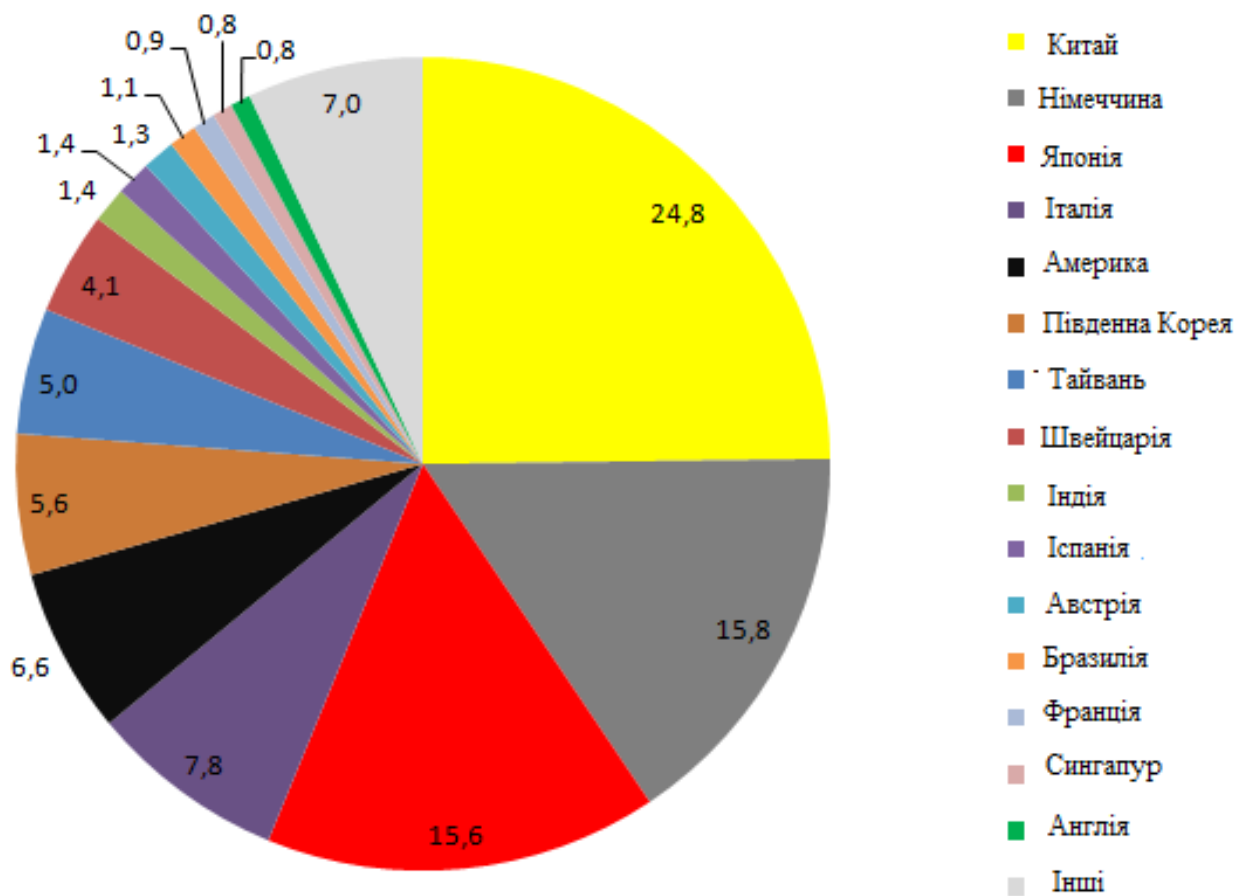


Рисунок 2.2 – Світовий ринок виробників обробляючих станків з ЧПУ

Для розрахунку обраний п'яти-координатний фрезерний комплекс з ЧПУ американської фірми Haas UMC-1500SS-DUO (рисунок 2.3).

В таблиці 2.2 представлені технічні характеристики фрезерного комплексу Haas UMC-1500SS-DUO.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики фрезерного комплексу Haas UMC-1500SS-DUO

Характеристика	Значення
Хід шпинделя по осі X	1524 мм
Хід шпинделя по осі Y	508 мм
Хід шпинделя по осі Z	508 мм
Швидкість руху шпинделя по осям X, Y, Z	30,5 м/хв
Потужність	22,4 кВт
Максимальні оберти шпинделя	12000 об/хв.
Максимальна швидкість обробки	16000 мм/хв.
Місткість інструментального патрону	30 шт.
Час зміни інструменту	3 с.
Час повороту деталі на 180°	6 с.
Об'єм баку змащувально-охоложувальної рідини	208 л.
Витрати повітря	113 л/хв.
Мінімальний необхідний тиск повітря	550 кПа
Напруга	220 В.
Сила току	70 А



Рисунок 2.3 – Фрезерний комплекс Haas UMC-1500SS-DUO

2.2 Розрахунок часу виготовлення нервюри фрезерним комплексом Haas UMC-1500SS-DUO

Визначимо за допомогою САПР «Компас» необхідні для розрахунків дані:

- об'єм заготовки – $V_{\text{загот.}} = 15535960 \text{ мм}^3$ (43,64 кг);
- об'єм деталі – $V_{\text{деталі}} = 1922129,684 \text{ мм}^3$ (5,382 кг);
- об'єм відходів від обробки – $V_{\text{відх.}} = 13613830,316 \text{ мм}^3$ (38,258 кг).

Для обладнання з ЧПУ час обробки деталі фрезеруванням можна розрахувати за формулою:

$$t_{\text{ЧПУ}} = \frac{V_{\text{фрез.1}}}{Q_{\text{фрез.1}}} + \frac{V_{\text{фрез.2}}}{Q_{\text{фрез.2}}} + t_{\text{зм.інстр.}} + t_{\text{позиц.}} + t_{\text{налагодж.}} ;$$

де, $t_{\text{ЧПУ}}$ – час затрачений на виготовлення деталі фрезеруванням (хв);

$V_{\text{фрез.1}}$ – об'єм, матеріалу видалений в процесі початкового фрезерування (мм^3);

$V_{\text{фрез.2}}$ – об'єм, матеріалу видалений в процесі чистового фрезерування (мм^3);

$Q_{\text{фрез.1}}$ – швидкість видалення матеріалу в процесі початкового фрезерування ($\text{мм}^3/\text{хв}$);

$Q_{\text{фрез.2}}$ – швидкість видалення матеріалу в процесі чистового фрезерування ($\text{мм}^3/\text{хв}$);

$t_{\text{зм.інстр.}}$ – час зміни інструменту (хв.);

$t_{\text{позиц.}}$ – час повороту заготовки на 180° ;

$t_{\text{налагодж}}$ – час налагоджування, до якого входить розміщення заготовки на базовій поверхні або базовому пристосуванні та настроювання параметрів обробки, $t_{\text{налагодж}} = 15$ хв.

При обробці швидкістю $Q_{\text{фрез.1}}$ складає 90 % обробки матеріалу, відповідно при швидкості $Q_{\text{фрез.2}}$ складе 10%. Тобто при початковій обробці буде видалено $12\,252\,447,316 \text{ мм}^3$ матеріалу, при чистовій – $1\,361\,383 \text{ мм}^3$.

Початкову обробку будемо проводити фрезою 12 мм. Рекомендована подача ріжучого інструменту при обробці Д16 і діаметром фрези 12 – 1550 мм/хв . Рекомендована глибина обробки 10 мм.

$$Q_{\text{фрез.1}} = 1550 \cdot 12 \cdot 10 = 186000 \text{ мм}^3/\text{хв.}$$

Чистова обробка проводиться фрезою 3 мм. Рекомендована подача ріжучого інструменту при обробці Д16 і діаметром фрези 3 мм – 1300 мм/хв . Рекомендована глибина обробки 10 мм.

$$Q_{\text{фрез.2}} = 1300 \cdot 3 \cdot 10 = 39\,000 \text{ мм}^3/\text{хв.}$$

Обробка виконується початковим і чистовим проходом з однієї сторони заготовки, після чого вона обертається на 180° і процес повторюється. В зв'язку з цим: $t_{\text{зм.інстр.}} = 9 \text{ с.} = 0,15 \text{ хв.}$, $t_{\text{позиц.}} = 6 \text{ с.} = 0,1 \text{ хв.}$

Час затрачений на фрезерування буде дорівнювати:

$$t_{\text{чпу}} = \frac{12252447,316}{186000} + \frac{1361383}{39000} + 0,15 + 0,1 + 15 = 116,03 \text{ хв} = 1 \text{ год } 56 \text{ хв};$$

На верхньому та нижньому поясах виконано по 86 отворів діаметром 6 мм. На передньому поясі виконано 22 отвори діаметром 5 мм, на задньому – 18 отворів діаметром 5 мм.

Час затрачений на свердління можна розрахувати за формулою:

$$t_{\text{ЧПУ (свердл.)}} = Q_{\text{свердл.}} \cdot n_{\text{отв.}} + t_{\text{переміщ.}} + t_{\text{зм.інстр}} + t_{\text{позиц}} + t_{\text{налагодж.}} ;$$

де, $t_{\text{ЧПУ (свердл.)}}$ – час затрачений на свердління (хв.);

$Q_{\text{свердл.}}$ – швидкість свердління 1 отвору (с);

$n_{\text{отв.}}$ – кількість отворів;

$t_{\text{переміщ.}}$ – сумарний час переміщення шпинделя між отворами.

Діагностовано рекомендовано свердлити при $N_{\text{свердл}} = 3030 \text{ об/хв.} = 50,5 \text{ об/с}$, при подачі ріжучого інструменту $s_{\text{об}} = 0,14 \text{ мм/об}$.

Швидкість виконання одного отвору визначимо за формулою

$$Q_{\text{свердл.}} = N_{\text{свердл.}} / (s / s_{\text{об}}) = 50,5 / (4 / 0,14) = 1,77 \text{ с.} = 0,0295 \text{ хв}$$

де, $N_{\text{свердл.}}$ – швидкість обертання шпинделя (об\с);

s – глибина свердління, ;

$s_{\text{об.}}$ – подача ріжучого інструменту.

Час затрачений на свердління:

$$t_{\text{ЧПУ (свердл.)}} = 0,0295 \cdot 212 + 1 + 0,1 + 0,15 + 15 = 22,5 \text{ хв}$$

Тобто сумарний час обробки деталі на фрезерному комплексі з ЧПУ розраховується як сума $t_{\text{ЧПУ (фрез.)}}$, $t_{\text{ЧПУ (свердл.)}}$ та $t_{\text{налагодж}}$ заготовки для виконання свердління.

$$t_{\text{ЧПУ}} = t_{\text{ЧПУ (фрез.)}} + t_{\text{ЧПУ (свердл.)}} = 116,03 + 22,5 = 138,53 \text{ хв} = 2 \text{ год } 18 \text{ хв } 32 \text{ с.}$$

2.3 Розрахунок використання енергії для виробництва нервюри фрезерним комплексом Haas UMC-1500SS-DUO

Енергетичні затрати при роботі фрезерного обладнання з ЧПУ залежить від коефіцієнта безпосередньої роботи обладнання. Згідно з даними багатьох підприємств, середній коефіцієнт безпосередньої роботи станків з ЧПУ становить 80%.

Загальні енергетичні затрати при фрезеруванні обладнанням з ЧПУ розраховують як суму енергозатрат на безпосередньо фрезерування та на виконання отворів:

$$E_{\text{ЧПУ}} = E_{\text{ЧПУ (фрезер.)}} + E_{\text{ЧПУ (свердл.)}}$$

Складові використання енергії на виконання операцій фрезерування та виконання отворів розраховуються за формулами:

$$E_{\text{ЧПУ (фрезер.)}} = P_{\text{ЧПУ}} \cdot (t_{\text{ЧПУ (фрезер.)}} \cdot LF_{\text{ЧПУ(фрез.)}} + t_{\text{запуск ЧПУ}})$$

$$E_{\text{ЧПУ (свердл.)}} = P_{\text{ЧПУ}} \cdot (t_{\text{ЧПУ (свердл.)}} \cdot LF_{\text{ЧПУ(свердл.)}} + t_{\text{запуск ЧПУ}})$$

де, $E_{\text{ЧПУ (фрезер.)}}$ – використання енергії на операції фрезерування (кВт);

$E_{\text{ЧПУ (свердл.)}}$ – використання енергії на операції свердління (кВт);

$P_{\text{ЧПУ}}$ – енерговикористання станка з ЧПУ (кВт/год);

$LF_{\text{ЧПУ(фрез.)}}$ – коефіцієнт безпосередньої роботи обладнання при фрезеруванні;

$LF_{\text{ЧПУ(свердл.)}}$ – коефіцієнт безпосередньої роботи обладнання при свердлінні;

$t_{\text{ЧПУ (фрезер.)}}$ – час обробки для процесу фрезерування (год);

$t_{\text{ЧПУ (свердл.)}}$ – час обробки для процесу свердління (год);

$t_{\text{запуск ЧПУ}}$ – час запуску станку з ЧПУ (год).

Згідно з технічними характеристиками Haas UMC-1500SS-DUO та результатами розрахунку часу, затраченого на обробку фрезеруванням і свердлінням, розрахуємо енергетичні затрати на процес фрезерування та свердління.

В таблицю 2.3 занесемо дані, необхідні для розрахунку енергозатрат.

Таблиця 2.3 – Дані, необхідні для розрахунку енергозатрат

Характеристика	Значення
Потужність обладнання	22,4 кВт
Час обробки для процесу фрезерування	1,94 год
Час обробки для процесу свердління	0,375 год
Час запуску станку з ЧПУ	0,17 год

Коефіцієнт безпосередньої роботи обладнання рівний:

$$LF_{\text{ЧПУ (фрез.)}} = (t_{\text{ЧПУ (фрезер.)}} - t_{\text{налагодж.}}) \cdot 100 / t_{\text{ЧПУ (фрезер.)}} = (1,94 - 0,25) / 1,94 = 0,871$$

$$LF_{\text{ЧПУ (свердл.)}} = (t_{\text{ЧПУ (свердл.)}} - t_{\text{налагодж.}}) \cdot 100 / t_{\text{ЧПУ (свердл.)}} = (0,375 - 0,25) / 0,375 = 0,334$$

Енергетичні затрати на процес фрезерування будуть дорівнювати:

$$E_{\text{ЧПУ (фрезер.)}} = 22,4 \cdot (1,94 \cdot 0,871 + 0,17) = 41,66 \text{ кВт}$$

Так як обладнання вже запущено перед фрезеруванням, в розрахунках енергетичних затрат на свердління час запуску обладнання не враховуємо.

Енергетичні затрати на процес свердління будуть дорівнювати:

$$E_{\text{ЧПУ (свердл.)}} = 22,4 \cdot 0,375 \cdot 0,334 = 2,8 \text{ кВт.}$$

Загальні затрати електричної енергії для виготовлення нервюри будуть становити:

$$E_{\text{ЧПУ}} = E_{\text{ЧПУ (фрезер.)}} + E_{\text{ЧПУ (свердл.)}} = 41,66 + 2,8 = 44,46 \text{ кВт.}$$

2.4 Розрахунок економічних витрат виробництва нервюри фрезерним комплексом Haas UMC-1500SS-DUO

Економічні аспекти виробництва грають важливу роль в наш час. Економічна ефективність часто являється ключовим критерієм для вибору технології виробництва для більшості виробників. Але дуже важливо враховувати всі ресурси, витрачені в процесі виробництва, для проведення всестороннього оцінювання вартості технології [10].

Затрати на виробництво можна поділити на дві категорії.

Перша категорія – це добре структуровані затрати [10]. До них відносять:

- затрати на робочу силу;
- затрати на матеріали;
- затрати на обладнання;
- затрати на електроенергію.

Друга категорія – це погано структуровані затрати [10]. Вони пов'язані з:

- помилками складання;
- настроюванням обладнання;

2.4.1 Розрахунок витрат на робочу силу

Участь оператора в виробництві передбачає час одночасної активності, час незалежної активності і час програмування обладнання.

Таким чином, загальні витрати на оператора при обробці деталі за допомогою обладнання з ЧПУ можна розрахувати наступним чином:

$$C_{\text{роб.ЧПУ}} = C_{\text{роб/год}} \cdot (t_{\text{ЧПУ}} + t_{\text{запуск ЧПУ}})$$

де, $C_{\text{роб.ЧПУ}}$ – загальні витрати на зарплатню оператору обладнання з ЧПУ за виробництво нервюри (грн.);

$C_{\text{роб/год}}$ – погодинні затрати на робочу силу (грн/год);

Середня зарплатня оператора фрезерного обладнання з ЧПУ в Україні складає 18000 грн., при п'ятиденному робочому графіку, за один робочий день оператор отримує 860 грн/день. При 8-часовому робочому дні, погодинна оплата оператору складає $C_{\text{роб/год}} = 107,50$ грн/год.

$$C_{\text{роб.ЧПУ}} = 107,5 \cdot (2,315 + 0,17) = 267 \text{ грн.}$$

2.4.2 Розрахунок витрат на матеріали

Оскільки обробка фрезеруванням з ЧПУ призводить до значних відходів від виробництва, доцільно включити в розрахунок вплив переробки металічної стружки на вартість виготовлення деталі. Зниження навантаження на виробництво за рахунок переробки відходів від фрезерування на обладнанні з ЧПУ являється дуже важливим аспектом, оскільки в процесі обробки нервюри, згідно з розрахунками, утворюється 87,67% відходів від початкової маси заготовки. Для виготовлення нервюри необхідна заготовка у формі плити розміром довжиною – 1139 мм, висотою – 311 мм та шириною – 44 мм. Маса заготовки буде складати 43,64 кг, її вартість складає 225 грн/кг.

При масі готової нервюри в 5,382 кг, при обробці заготовки масою 43,64 кг утвориться 38,258 кг відходів від виробництва у вигляді стружки. Вартість здачі стружки алюмінієвих сплавів – 22 грн/кг

Затрати, на матеріали при фрезеруванні розраховують за наступною формулою:

$$C_{\text{мат.ЧПУ}} = (C_{\text{загот.}} \cdot M_{\text{загот.}}) - (C_{\text{повт.перероб.}} \cdot M_{\text{відходів}});$$

де, $C_{\text{мат.ЧПУ}}$ – витрати на матеріал, при обробці на обладнанні з ЧПУ;

$C_{\text{загот.}}$ – вартість заготовки (грн./кг);

$M_{\text{загот.}}$ – маса заготовки (кг);

$C_{\text{повт.перероб.}}$ – вартість металічної стружки для повторної переробки заготовки (грн./кг);

$M_{\text{відходів}}$ – маса металічної стружки, утвореної внаслідок обробки (кг);

Витрати на матеріал будуть становити:

$$C_{\text{мат.ЧПУ}} = (225 \cdot 43,64) - (22 \cdot 38,258) = 9819 - 841,7 = 8977 \text{ грн. } 30 \text{ коп.}$$

2.4.3 Розрахунок витрат на електроенергію

Згідно тарифами для виробничих підприємств в Україні, вартість електроенергії складає 2,86 грн./кВт · год.

Затрати на електроенергію для виготовлення деталі на фрезерному обладнанні розраховуються за формулою:

$$C_{\text{енерг. ЧПУ}} = E_{\text{ЧПУ}} \cdot C_{\text{енерг.}}$$

де, $C_{\text{енерг. ЧПУ}}$ – витрати на електроенергію для виготовлення деталі на фрезерному обладнанні (грн.).

$E_{\text{ЧПУ}}$ – енерговикористання виготовлення деталі на фрезерному обладнанні. (кВт);

$C_{\text{енерг.}}$ – вартість електроенергії (грн/кВт).

Затрати на електроенергію для виготовлення деталі на фрезерному обладнанні будуть складати:

$$C_{\text{енерг. ЧПУ}} = 44,46 \cdot 2,86 = 127,2 \text{ грн.}$$

Для виготовлення однієї нервюри фрезерним комплексом Haas UMC-1500SS-DUO, відповідно до використання електроенергії та її ціни витратиться 127,2 грн.

2.4.4 Розрахунок загальних витрат

Загальні витрати на виробництво – це сума добре структурованих та погано структурованих затрат.

До погано структурованих затрат відносять настроювання обладнання та помилки складання. Настроювання обладнання не несе за собою прямих економічних витрат та враховане при розрахунку часу виробництва. Помилки складання виникають внаслідок людського фактору при операціях закріплення заготовки та настроювання обладнання. В зв'язку з цим до розрахунку загальних витрат виробництва за допомогою обладнання з ЧПУ вноситься можливість виникнення браку. Згідно з даними підприємств в яких задіяні процеси пов'язані з обробкою деталей на станках з ЧПУ, відсоток браку рівний 2% [11].

Загальні економічні витрати для технології фрезерування з ЧПУ розраховується за формулою:

$$\begin{aligned} C_{\text{заг.ЧПУ}} &= \sum C_i \text{ ЧПУ} + 0,02 \sum C_i \text{ ЧПУ} = C_{\text{роб.ЧПУ}} + C_{\text{мат.ЧПУ}} + C_{\text{енерг.ЧПУ}} + 0,02(C_{\text{роб.ЧПУ}} + \\ &+ C_{\text{мат.ЧПУ}} + C_{\text{енерг.ЧПУ}}) = 267 + 8977,30 + 127,2 + 0,02(267 + 8977,30 + 127,2) = \\ &= 9371,5 + 0,02(9371,5) = 9371,5 + 187,5 = 9559 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Для виготовлення однієї нервюри на фрезерному комплексі Haas UMC-1500SS-DUO витрачається 9559 грн.

Висновки до розділу 2

В даному була проаналізована конструкція бортової нервюри консолі крила літака Ан-148 та створена її 3D модель.

Конструктивно нервюра – монолітна, балочного типу і виконана у вигляді суцільних стінки та поясів. На сторонах стінки вифрезеровані по 13 стійок з обох сторін, які виконують функцію ребер жорсткості. До верхнього і нижнього поясів нервюри кріплять панелі обшивки, тому вони мають геометричну форму, яка повністю повторює аеродинамічний профіль крила.

Для розрахунку оптимальності виготовлення нервюри шляхом фрезерування був проаналізований світовий ринок виробників фрезерного обладнання з ЧПУ та обраний п'яти-координатний фрезерний комплекс американської фірми Haas UMC-1500SS-DUO.

Визначено, що в результаті обробки утворюється 87,67% від початкової маси заготовки.

Розрахований час виготовлення нервюри, який становить 2 год 18 хв 32 с. Використання електроенергії складає 44,46 кВт. Також розраховані грошові витрати на зарплатню оператору станку, на електроенергію та матеріали, а також враховані втрати коштів при виникненні браку. Загальна їх сума склала 9559 грн.

3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА НЕРВЮР

3.1 Аналіз адитивного виробництва

Основними характеристиками сучасного літального апарату, які враховуються при його проектуванні є: маса повітряного судна, міцність, технологічність, а також екологічні аспекти. Вони тісно взаємопов'язані між собою. Чим нижче маса літака, тим менше витрата палива, а також більше корисного навантаження можна завантажити в літальний апарат. Це сприятливо позначається не тільки на фінансову складову авіаційної діяльності, а й на екологію. Створення конструкції з малою масою, але високою міцністю можливо шляхом застосування сучасних матеріалів і проектуванням деталей зі складною геометричною конфігурацією. На виробничому етапі процес виготовлення даних деталей може бути дуже трудомістким або неможливим.

Сучасні методи виробництва можна поділити на 2 типи: субтрактивне і адитивне.

Субтрактивне виробництво вважається більш традиційним в наш час і передбачає виготовлення деталей за допомогою механічної обробки шляхом лиття, зварювання, прокату, гнуття, штампування, фрезерування, виточування, свердління та ін., на спеціально призначеному для тієї чи іншої операції обладнанні. Для виготовлення однієї деталі може знадобитися постійне переобладнання оснащення або використання цілого комплексу верстатів. Ці чинники роблять даний тип виробництва дуже трудомістким і дорогим в плані його підготовки. Операції пов'язані з різанням представляють собою видалення матеріалу з заготовки для створення готової деталі, що тягне за собою велику кількість відходів. Деталі створені шляхом зварювання вимагають ретельного контролю швів, що збільшує трудомісткість виробництва [12].

Рішення даних проблем, можливо із застосуванням технології адитивного виробництва. Метою даної роботи є вирішення проблеми пов'язаної з високою вартістю, високою трудомісткістю і високим рівнем відходів при виготовленні нервюр за допомогою субтрактивного виробництва. А також неможливістю,

виробляти деталі складних геометричних форм традиційними методами виробництва [12].

Адитивне виробництво (рисунок 3.1) - це процес створення об'єкта по його моделі створеної в САПР, шляхом укладання ультратонких шарів матеріалів один на одного за допомогою спеціального обладнання для 3D-друку. Програмне забезпечення «розрізає» 3D-модель на ультратонкі шари, ця інформація передається на голівку яка наплавляє матеріал на попередній шар. Після охолодження або затвердіння матеріал утворює цілісний тривимірний об'єкт [13].

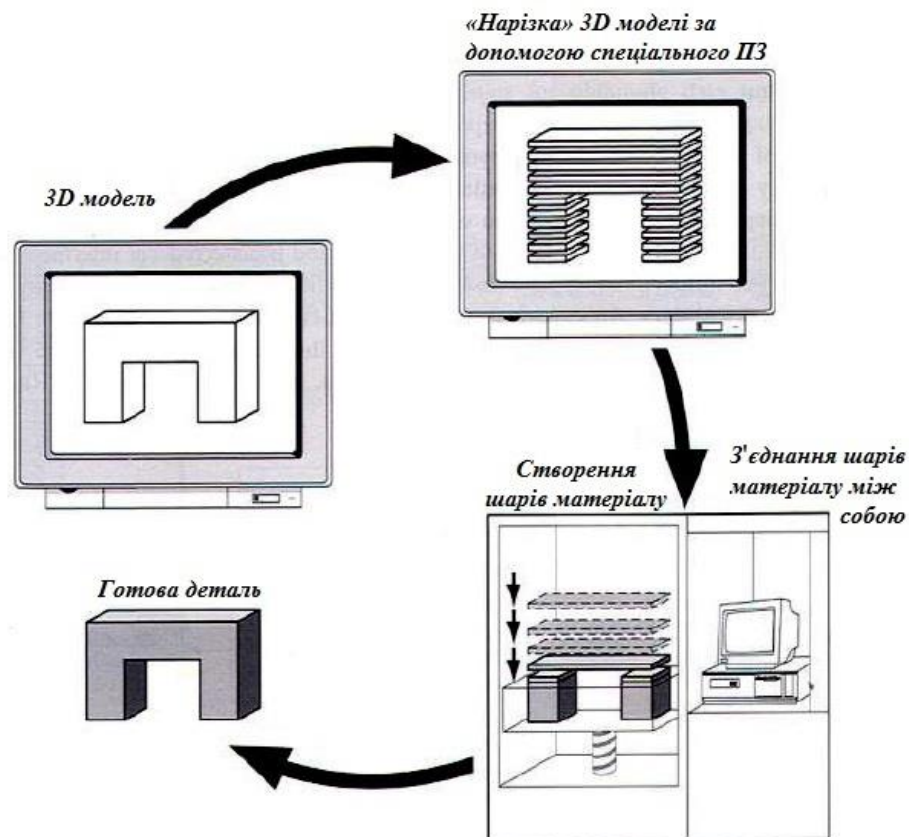


Рисунок 3.1 – Схема виготовлення деталей за допомогою адитивної технології

Створювати деталі можна різними способами [14]:

- екструзії;
- шляхом струменевого наплення;
- ламінуванням;
- ультрафіолетовим затвердінням;
- сплавом матеріалів.

Основні технології створення виробів на адитивному обладнанні [14]:

- Selective Laser Melting (SLM) (рисунок 3.2) - селективне лазерне плавлення металевих порошків по 3D моделям з використанням ітербієвого лазера;
- Laser Stereolithography (SLA) - пошарове затвердіння рідкого матеріалу лазером;
- Selective Laser Sintering (SLS) - селективне лазерне спікання променями лазера порошкоподібного матеріалу;
- Fused Deposition Modeling (FDM) - пошарове наплавлення пластикової нитки;
- MultiJet Printing (MJP) - багатоструменеве моделювання фотополімером або воском;
- ColorJet Printing (CJP) - повнокольоровий 3D-друк шляхом склеювання спеціального порошку на основі гіпсу.

Для адитивного виробництва може використовуватися широкий спектр матеріалів у вигляді порошків, дроту і рідких матеріалів. В основному це: віск, ультрафіолетові і фотозатверджуючі рідкі полімери, гіпсовий порошок, склонаповнені, вугленаповнені і металонаповнені поліаміди у вигляді порошків, полістирол, порошок металевих сплавів [13, 14].

В авіаційній галузі найбільш широко можна застосувати технологію адитивного виробництва металевих деталей з порошкоподібних сплавів.

3D-друк металевих деталей полягає в послідовному сплаві (SLM технологія) або спіканні (SLS технологія) шарів металевих порошків за допомогою випромінювання лазера.

Так як при SLS утворюється більш пориста структура об'єкта, то для деталей, які піддаються високим навантаженням раціонально використовувати технологію SLM.

Сутність технології Selective Laser Melting (SLM) полягає у пошаровому повному розплавленні металевих порошків.

Друк відбувається в камері SLM-обладнання, яка заповнюється інертним газом (аргоном або азотом) перед друком. На робочу поверхню подається металевий порошок, який рівномірно розподіляється на ній. Потім за допомогою випромінення потужного ітербієвого лазера порошок вибірково, згідно з математичною CAD-моделлю розплавляється утворюючи шари майбутньої деталі.

Надлишки порошку після завершення друку автоматично здуваються стиснутим повітрям до спеціальної камери обладнання, залишаючи об'єкт з гладкою поверхнею, яка зазвичай вимагає невеликої подальшої обробки або взагалі не вимагає її [15].

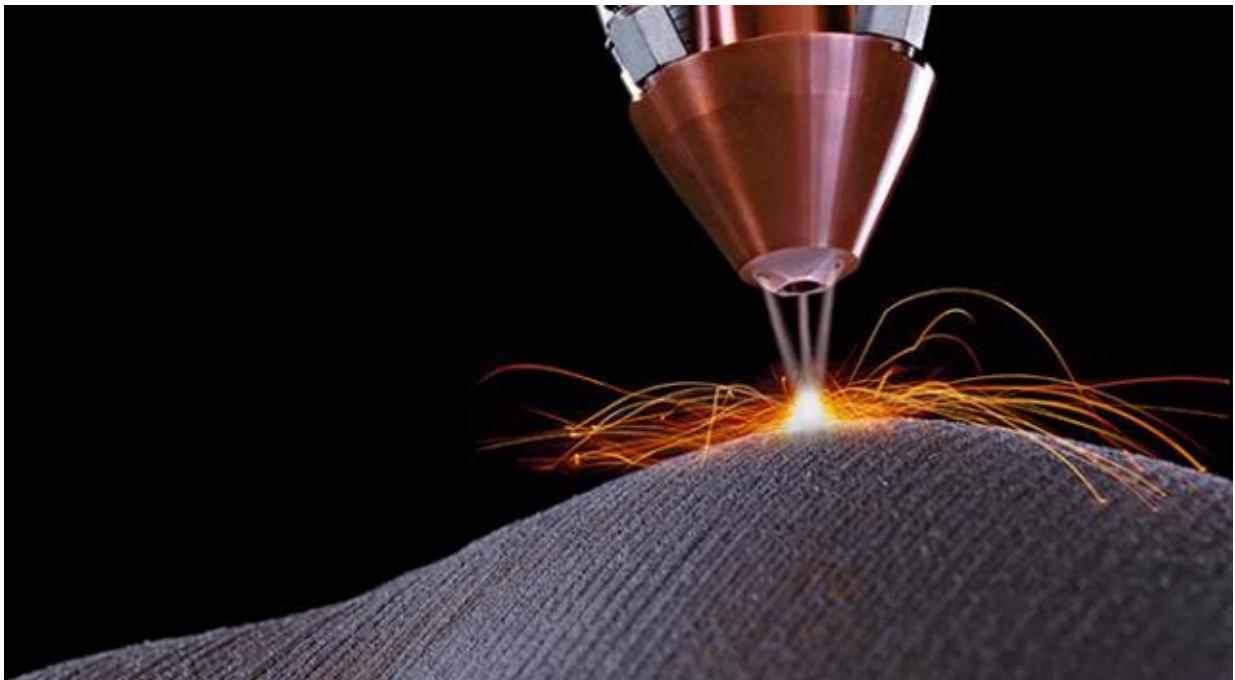


Рисунок 3.2 – Selective Laser Melting Technology

Для адитивного виробництва можуть використовуватися широкий спектр металів, в залежності від призначення готового виробу [16]:

— нержавіючі сплави (AISI 316L, 17-4PH, AISI 410, AISI 304L, 15-5PH, AISI 904L) мають високу корозійну стійкість і можуть працювати при температурах +550 ... 800 °C.

— інструментальні сплави (1.2343, 1.2344, 1.2367, 1.2709) мають підвищену твердість і зносостійкість.

— нікелеві сплави (Inconel 625, Inconel 718, Inconel 939, Invar 36, NX) мають здатність розчиняти в собі багато інших метали, зберігаючи при цьому пластичність, мають високу жароміцність. Сплав з хромом застосовують для робітників і соплових лопаток, дисків ротора турбін, деталей камери згоряння авіаційних двигунів.

— кобальт-хром (CoCr) використовують для виготовлення корпусів складних геометричних форм в електроніці, харчовому виробництві, авіабудуванні, ракетобудуванні та машинобудуванні, а також кламмерной протезів.

— бронза (CuSn6, CuSn10) має високі показники теплопровідності і використовується для створення систем охолодження.

— алюмінієві сплави (AlSi10Mg, AlSi12, AlSi7Mg0.6, AlSi9Cu3) володіють високим відношенням міцності до маси і мають високі корозійну стійкість і стійкість до корозії.

— титанові сплави (Ti6Al4V, Ti6Al7Nb) мають високу міцність при невеликій масі. Можуть працювати при високих температурах (до + 1100 ° C), тому можуть широко використовуватися для виготовлення деталей газотурбінних двигунів.

Металеві сплави для адитивного обладнання проводиться у вигляді дрібнодисперсних зерен розміром від 4 до 80 мкм. Розмір гранул визначає товщину деталі, яка буде виготовлена. При створенні металевого порошку необхідно чітко дотримуватися пропорції великих і дрібних гранул, тому що від цього залежить рівномірність подачі матеріалу, що впливає на рівномірність шарів, отже і якості готової деталі [16].

Переваги адитивного виробництва:

- створення деталей без переобладнання оснащення;
- нижча маса готових виробів;
- можливість створення деталей складних геометричних форм, які дорого або неможливо створити за допомогою субтрактивного виробництва;

- мінімізація кількості відходів від виробництва і економія матеріалу, що позитивно відображається на економічному та екологічному аспекті;
- гнучкість дизайну: можливість створювати об'єкти складних геометричних форм, які не потребують складання, що дозволяє зменшити кількість кріпильних елементів і знизити масу деталей;
- низька трудомісткість виготовлення деталей;
- виключення потреби в додатковому обладнанні: для роботи необхідний лише 3D принтер та комп'ютер для створення моделі та матеріал для виробництва деталі.;
- мінімізація помилок, пов'язаних з людським фактором;
- швидке виконання проектів, оскільки помилки можна виправити в документі САПР і виготовити новий прототип в дуже короткий термін;
- стала ціна незалежно від об'єму виробництва, через відсутність необхідності виготовлення додаткового індивідуального оснащення як при субтрактивному виробництві. Порівняння ціноутворення від об'єму виробництва показано на графіку (рисунок 3.3)

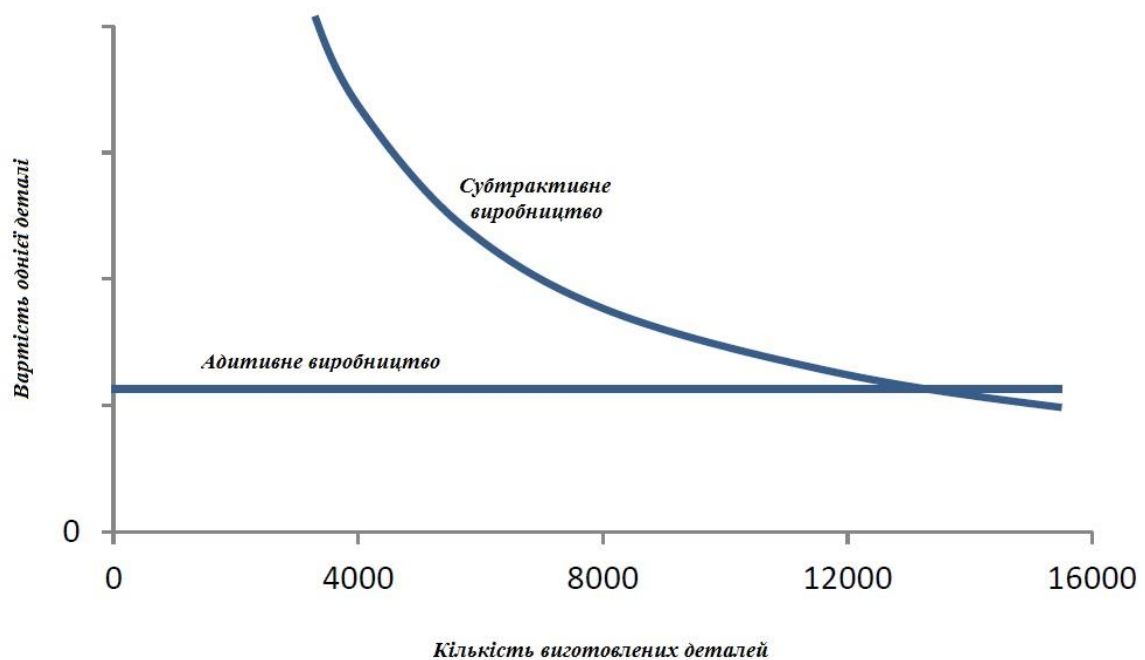


Рисунок 3.3 – Порівняльний графік залежності вартості деталей від об'єму виробництва

З кожним роком запровадження адитивного виробництва стрімко зростає. Томас і Дуглас зробили дослідження і вивели тенденцію зросту використання адитивного виробництва в світі для різного потенціалу ринку [17] (рисунок 3.4).

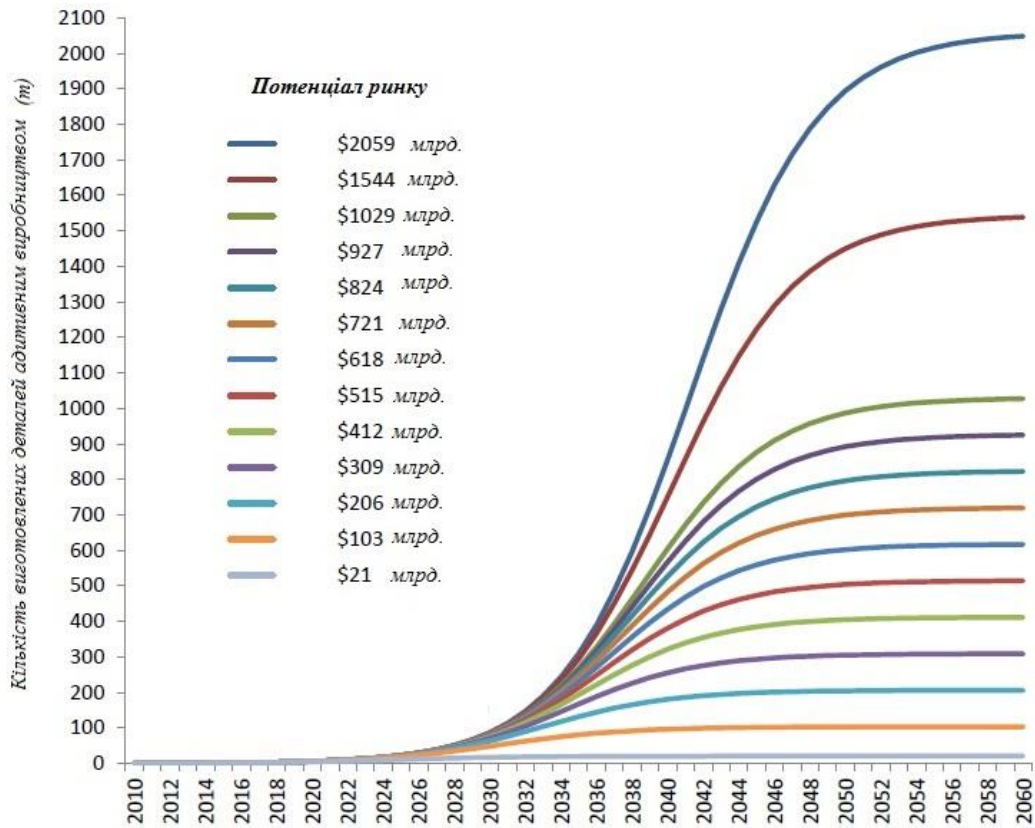


Рисунок 3.4 – Тенденція використання адитивної технології в світі

Вохлер і Кеффрі зробили аналіз ринку використання адитивної технології та розбили його по областям використання (рисунок 3.5). Головними секторами використання адитивної технології є: автомобільна та аерокосмічна галузі, виробництво промислового обладнання, електроніка та медицина [18].

Адитивне виробництво вже запровадили в авіакосмічній галузі в різних компаніях та досягли успішних результатів.

У 2013 році НАСА успішно випробувала ракетну форсунку, виготовлену за технологією SLM, домігшись тяги в 9072 кг. За інформацією НАСА за допомогою субтрактивної технології для виготовлення даної форсунки потрібно більше року, при використанні адитивної технології знадобилося менше ніж 4 місяці, з 70% зниженням витрат на виробництво [19].

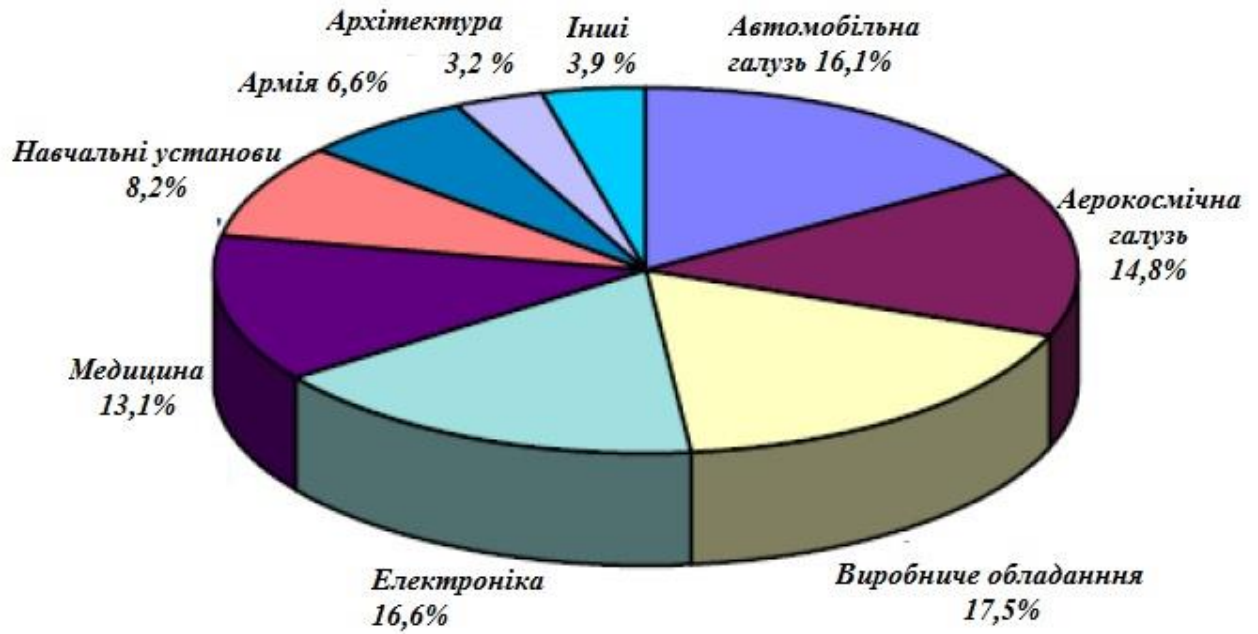


Рисунок 3.5 – Використання адитивного виробництва в різних галузях

Компанія Airbus використала адитивну технологію для створення титанового кронштейну для пілонів двигуна A350 (рисунок 3.6). Виготовлення даного кронштейну за допомогою фрезерування неможливе.



Рисунок 3.6 – Кронштейн для пілонів двигуна A350, виготовлений адитивною технологією

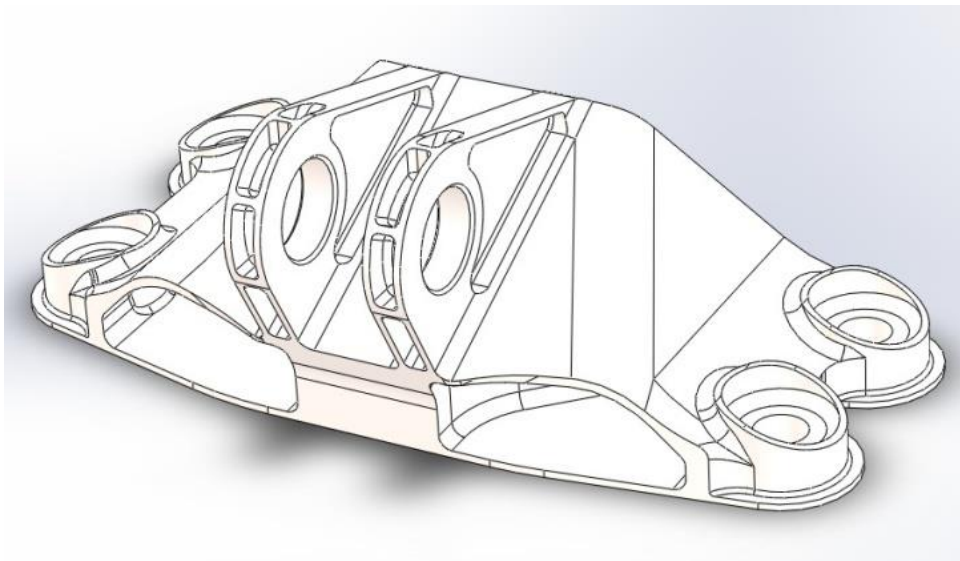
Двигун CFM LEAP оснащений 19 паливними форсунками створеними по адитивної технології (рисунок 3.7) зі сплаву нікелю і кобальту. За даними General Electric ці форсунки на 25% легше попередніх, в 5 разів міцніше, а також конструктивно простіше. Раніше форсунка складалася з 18 деталей, тепер - всього з однієї. Надруковані на 3D-принтері форсунки перевершують попередню модель і з точки зору конструктивних особливостей, зокрема, системи охолодження і підтримують вузлів. Очікується, що за рахунок цих структурних особливостей надруковані на 3D-принтері деталі будуть служити в 5 разів довше, ніж форсунки, вироблені за традиційною технологією [20].

Двигун GE9X встановлений на Boeing 777X оснащений більш 300 деталями, виготовленими по адитивної технології. За інформацією General Electric 3D-друк дозволила добитися паливної економічності на 10% більше, ніж у попередника GE90 [21].

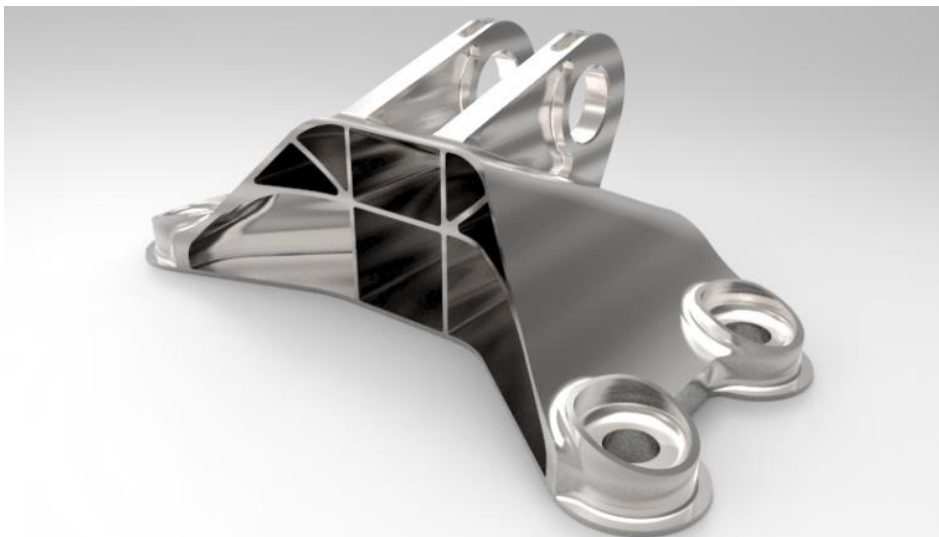


Рисунок 3.7 – Паливна форсунка CFM LEAP, виготовлена по адитивній технології

Конкурс GrabCAD, створений для проектування виробів і подальшого їх провадження у адитивної технології. За заявкою GE в 2013 році М Арі Курніван, спроектував для 3D-друку кронштейн (рисунок 3.8), маса якого була менше на 84% маси оригінального кронштейна. Йому вдалося знизити вагу з 2033 грама до 327 грамів. Компанія GE Aviation виготовила кронштейн з титанового сплаву технологією SLM. Потім кронштейн успішно пройшов випробування, де піддався осьовим навантаженням від 3600 кг до 4300 і моменту в 565 Н/м [22].



а)



б)

а) 3D-модель; б) виготовлений кронштейн

Рисунок 3.8 – Кронштейн, створений за адитивною технологією

3.2 Топологічна оптимізація нервюри та вибір обладнання для її виготовлення

Створення деталей складної геометричної форми, які можуть витримувати задані навантаження неможливе без обчислювальної техніки, яка дозволяє оптимізувати топологію конструкції та створити генеративний дизайн деталі.

Оптимізація топології або генеративний дизайн – це ітеративний процес проектування, який включає в себе програму, яка генерує певну кількість вихідних даних, які задовольняють певні обмеження і проектувальника, який налаштовує можливу область змін. Іншими словами, це ітераційний алгоритм для запуску циклу оптимізації проекту, який генерує найкращу можливу форму на основі вказаної проектувальником інформації, такої як: навантаження, обмеження, граничні умови та виробничі засоби керування [23].

Ціллю дослідження топології – підвищити конструктивну ефективність окремої деталі або всього складання без необхідності жертвувати функціональністю через виробничі обмеження. Ідеальне дослідження топології – це таке дослідження, при якому врахований кожен випадок навантаження і деталь може його витримати [23].

Це дослідження дозволяє знижувати або підвищувати різні характеристики деталей або складань такі як:

- маса;
- об'єм деталі;
- загальна енергія деформації;
- зміщення окремих вузлів;
- взаємне переміщення вузлів;
- напруження елементів.

На основі цієї математичної дисципліни були розроблені алгоритми для засобів генеративного проектування та програмне забезпечення для їх рішення.

Програмне забезпечення (ПЗ) не будує модель з нуля, а використовує готову. Після завантаження моделі в ПЗ для топологічної оптимізації відмічають місця, які повинні залишитись без змін, наприклад аеродинамічні поверхні, місця кріплень тощо. Тіло моделі, яка не відноситься до таких місць, являється зоною де ПЗ може змінювати геометрію. Потім необхідно вказати навантаження, які будуть діяти на деталь і місця їх прикладання, тобто створити силову схему навантажень. На основі заданих параметрів, програма аналізує напруження в кожному перерізі і створює оптимізовану геометрію[23].

Програмне забезпечення у поєднанні з потужними цифровими комп'ютерами, які можуть досліджувати дуже велику кількість можливих комбінацій елементів. Кожна ітерація тестує варіанти деталі і оновлює рішення згідно з крайнім найкращим результатом, щоб обрати найбільш ефективну оптимізовану конструкцію.

Щоб виконати топологічну оптимізацію обраної нервюри необхідно визначити навантаження, що діють на неї.

Згідно з технічною документацією по Ан-148 на стикову частину консолі крила з центропланом діють підйомна сила та крутний момент. Підйомна сила консолі рівна 206000 Н, крутний момент $M_z = -112652$ Н/м [8].

Крутний момент розкладаємо як пару сил, яка діє на верхній на нижній пояси нервюр.

На верхній пояс діє сила P_{M1} , на нижній пояс – P_{M2} :

$$P_{M1} = M_z \cdot H_1 / (2 \cdot F_k); P_{M2} = -M_z \cdot H_2 / (2 \cdot F_k);$$

де, P_{M1} , P_{M2} – складові сили від M_z ;

M_z – крутний момент;

H_1 , H_2 – висоти першого і другого лонжеронів по 3 нервюрі крила;

F_k – площа замкнутого контуру перерізу профілю 3 нервюри крила.

Звідси отримаємо:

$$P_{M1} = (-11265200 \cdot 25) / 29189,58 = 9648,3 \text{ кг} = -96483 \text{ Н};$$

$$P_{M2} = (11265200 \cdot 21) / 29189,58 = 8104,6 \text{ кг} = 81046 \text{ Н}.$$

Для виконання топологічної оптимізації, для зменшення навантаження на обчислювальну техніку, спростимо конструкцію нервюри, прибравши ребра жорсткості, скруглення та отвори. Імпортуємо 3D модель, створену в Компас 3D в ПЗ Solid Edge, де прикладемо навантаження на неї та вкажемо її закріплення по лонжеронам крила (рисунок 3.9).

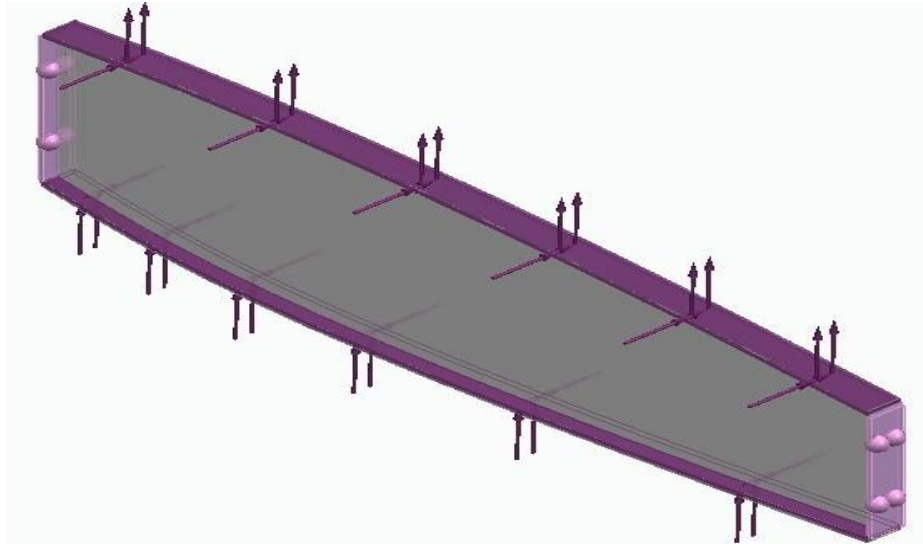


Рисунок 3.9 – Нервюра, підготовлена до топологічної оптимізації

Було виконано три варіанти оптимізації з різним відсотком зниження маси. В результаті першої оптимізації була отримана нервюра (рисунок 3.10) зі зниженням маси до 3,539 кг. Маса знизилась на 34,25 %. Час оптимізації склав 3 години 52 хв.

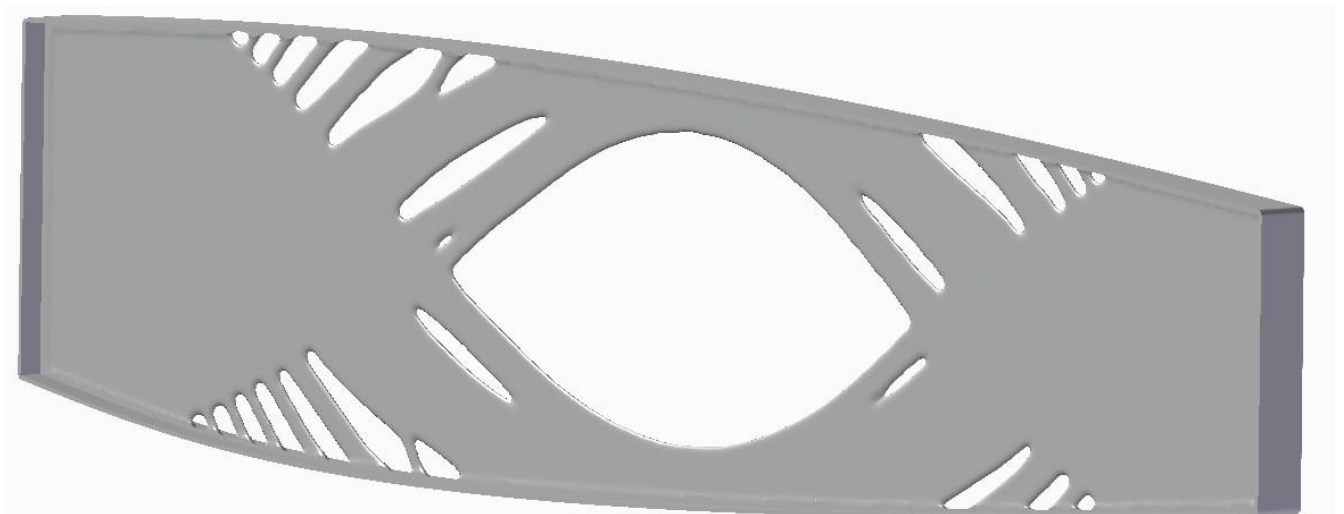


Рисунок 3.10 – Результат першої оптимізації

Результати обрахунку програми показали, що дана нервюра має достатні показники надійності і є можливість для подальшого зменшення маси. Тому виконано другу оптимізацію. Її результатом стала нервюра (рисунок 3.11), маса якої склала 2,154 кг. Маса знизилась на 60 %. Час оптимізації – 5 год. 12 хв.

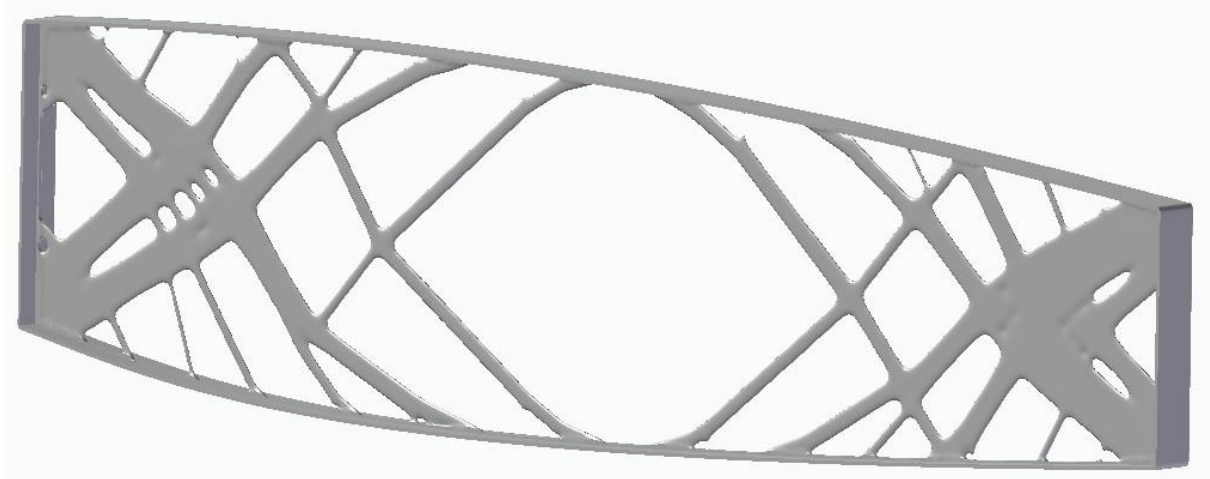


Рисунок 3.11 – Результат другої оптимізації

Результати обрахунку програми показали, що дана нервюра має не достатні показники надійності і ПЗ показало найоптимальнішу конструкцію. Тому прийнято рішення виконати третю оптимізацію. І отримано оптимальну оптимізовану конструкцію нервюри (рисунок 3.12).

Результатом третьої оптимізації стала нервюра масою 2,509 кг і об'ємом $896,07 \text{ см}^3$. Тобто за допомогою топологічної оптимізації досягнуто зниження маси в 2,873 кг, тобто маса знижена на 53,4%. Час оптимізації склав 10 годин 16 хвилин. Результат розрахунку програми Solid Edge показав, що дана нервюра має достатні показники міцності і надійності для заданих навантажень.

Виготовлення даної нервюри можливе лише за використанням адитивної технології виробництва.

Технології, якими можна виготовити нервюру з різних металів, серед яких сталі, титанові та алюмінієві сплави – SLM та SLS.

Так як при SLS, утворюється більш пориста структура об'єкта, то для виготовлення нервюр раціонально використовувати технологію SLM.

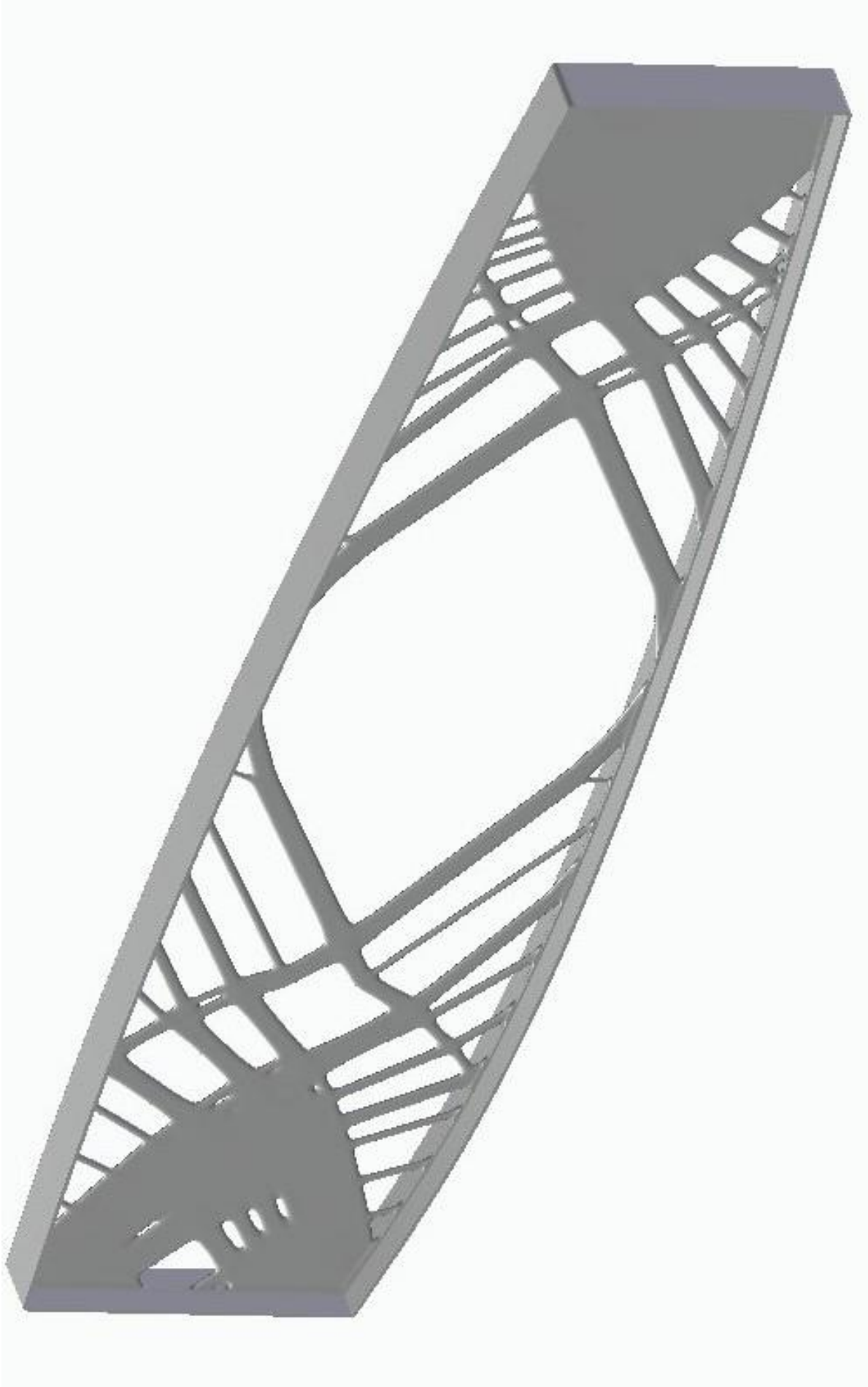


Рисунок 3.12 – Нервюра з оптимізованою топологією

Для розрахунку ефективності виробництва нервюри технологією SLM, необхідно обрати обладнання.

Рональд Бергер, дослідив ринок та склав відсоткову діаграму розподілення виробників SLM принтерів (рисунок 3.13) [24].

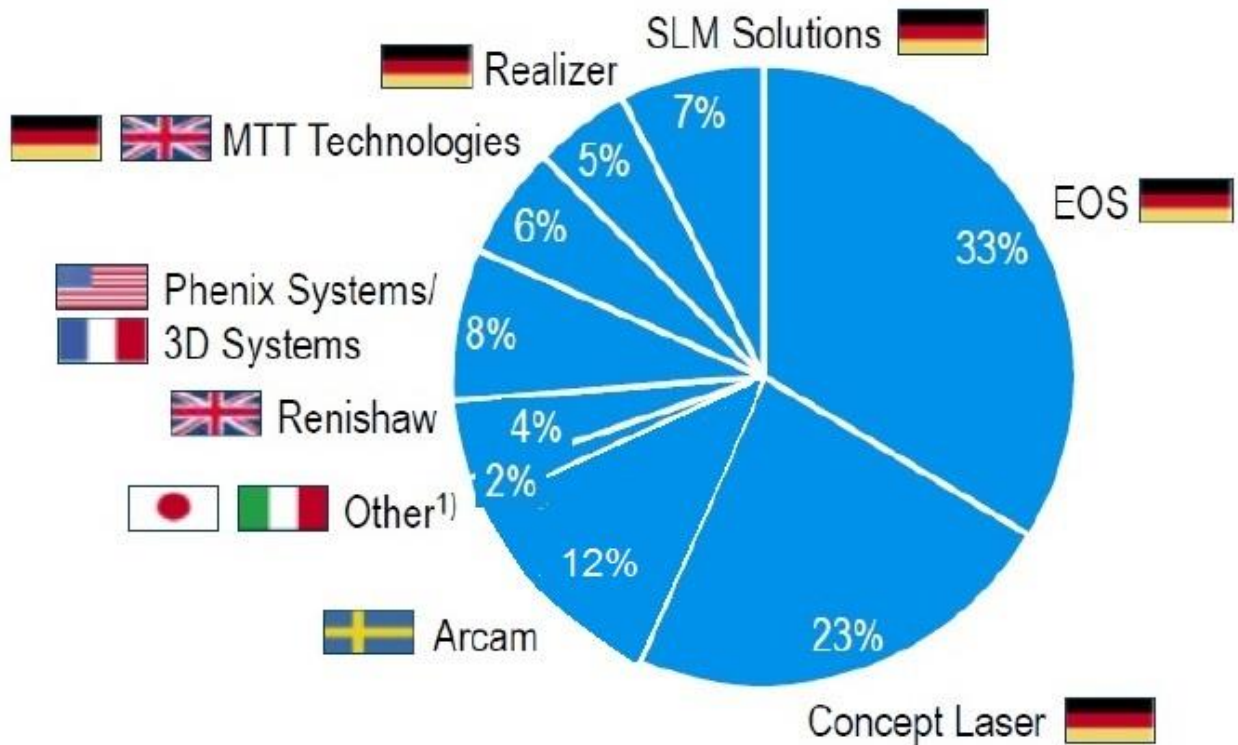


Рисунок 3.13 – Ринок виробників SLM принтерів в світі

З діаграми видно, що ринок SLM принтерів поділений на 9 основних виробників: EOS, Concept Laser, Arcam, SLM Solutions, Phenix Systems, 3D Systems, MTT Technologies, Realizer, Renishaw.

Для виробництва оптимізованої нервюри обраний 3D принтер компанії SLM Solutions моделі SLM 800 (рисунок 3.14).

SLM 800 – обладнання широкоформатної селективного лазерного плавлення металевих порошків для автоматизованого серійного виробництва. Оснащений найбільшою на ринку робочою камерою, що дозволяє ефективно створювати великі деталі і відкриває нові виробничі можливості. Він має найбільшу робочу камеру для друку на ринку SLM принтерів в світі [25].



Рисунок 3.14 – 3D принтер компанії SLM Solutions моделі SLM 800

SLM 800 оснащений запатентованими компанією SLM Solutions інноваціями такими як:

- Автономна система збору, просіювання та подачі невикористаного порошку, що дає можливість майже виключити відходи від виробництва [25].
- Двонаправлена система нанесення порошку – металева щітка інноваційної конструкції забезпечує стабільне нанесення шару порошку, дозволяючи коригувати незначні помилки, які можуть виникнути під час друку, такі як короблення та задири [25].
- Можливість підключення декількох принтерів через SLM HUB. Він дозволяє автоматично витягувати готовий виріб з принтеру та встановлювати нову підложку для друку нової деталі. Також він оснащений спеціальними камерами для попереднього нагріву (перед початком друку) та охолодження (після завершення друку) в умовах заповнення цієї камери інертним газом. До одного SLM HUB можна підключити до п'яти принтерів SLM 800 з повною автоматизацією друку [25].

- Модуль «вічного» фільтру – система очистки інертного газу від продуктів, які виділяються при плавленні порошку та частинок порошку. Побочні продукти плавлення в копусі фільтру покриваються інгібітором і зберігаються в ньому до утилізації, в той час очищений інертний газ повертається до робочої камери для повторного використання, що забезпечує високу якість деталей. Модуль вічного фільтру підвищує безпеку роботи обладнання, разом з тим збільшує час безвідмовної роботи системи, знижує затрати на її експлуатацію та зменшує викиди інертного газу у навколишнє середовище [25].

Технічні характеристики SLM 800 представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики SLM 800

Характеристика	Значення
Розмір робочої камери	500x280x875 мм
Товщина шару	20-90 мкм
Швидкість друку	171 см ³ /год
Мінімальний розмір деталі	150 мкм
Операційний фокус лазерного променя	80-115 мкм
Швидкість сканування	10 м/с
Потужність лазера	700 Вт
Кількість лазерів	4
Формат файлів	.STL
Розмір обладнання	3,8x1,25x3,8 м
Вага обладнання	2400 кг
Тип електроживлення	400 В, 63 А, 50/60 Гц
Енерговикористання	8 кВт/год

Обладнання оснащено резервуаром для порошку для організації прямої подачі матеріалу. Додатковий центральний блок подачі порошку має два баки по 220 л, один фіксований для подачі порошку в процесі друку, інший – переносний, для заправки порошку.

Всесторонній моніторинг і забезпечення якості друку забезпечують високий рівень протоколювання і контролю процесів плавлення. Контролюються такі параметри як: температура в робочій камері, рівень вмісту кисню в інертному газі, сканування надрукованого шару, стабільність потоку інертного газу та інше [25].

Такий рівень керування процесом друку забезпечує стабільну і високу якість процесу виробництва.

Для високої ефективності виробництва необхідно дотримуватись концепції бережливого виробництва. Ключовою фактором концепції є ідентифікація несприятливих факторів, які розділяють на такі категорії [11]:

1) Перевиробництво – відбувається тоді, коли виробляється більше ніж потрібно в даний момент, «про запас»;

2) Транспортування – не вносить змін в продукцію, але може вплинути на втрати часу при доставці матеріалу та призвести до очікування.

3) Доробка та виправлення дефектів – призводять до додаткових витрат ресурсів.

4) Надмірна обробка – відбувається тоді, коли виконується більше роботи, ніж необхідно.

5) Непотрібний рух – призводить до непотрібних витрат часу і ресурсів.

6) Очікування – призводить до виникнення простою робочої сили та обладнання.

Виробництво, яке передбачає використання станків з ЧПУ часто зустрічається з більшістю з цих факторів. Наприклад закупівлі заготовок з різного матеріалу та різного розміру, для виробництва різних деталей «про запас» за ради економії коштів на їх доставці з подальшим їх зберігання веде перевиробництва, а також необхідності збереження та ведення обліку зайвих заготовок. Доробка може знадобитися для місць обмежених для обробки обладнанням. Обробка з використанням обладнання з ЧПУ включає в себе операції транспортування в робочу зону та закріплення заготовки, а також

налагодження станку для кожної окремої деталі. Це тягне за собою непотрібний рух та можливість виникнення помилок пов'язаних з людським фактором.

Адитивне виробництво дозволяє уникнути всіх цих несприятливих факторів. Немає необхідності використання різних заготовок, деталі виготовляються з порошку. Виключаються операції транспортування заготовок до робочої зони та їх закріплення та налагодження обладнання перед кожною деталлю, адитивне виробництво передбачає в собі виготовлення деталей з нуля. Завдяки цьому знижується трудомісткість, час на підготовку та виключаються помилки пов'язані з людським фактором.

3.3 Розрахунок часу виробництва нервюри на SLM 800

Специфіка технології SLM передбачає виготовлення деталі з нуля, шляхом пошарового наплавлення порошку, без необхідності використання заготовки. Також не враховується геометрична складність деталі, при використанні технології SLM, незалежно від геометричної форми деталі, час виробництва буде залежати тільки від об'єму деталі. В зв'язку з відсутністю технологічних обмежень є можливість виготовляти топологічно оптимізовані деталі. Тому при визначенні часу виготовлення деталей шляхом SLM враховується тільки об'єм порошку, який використовується для печаті та швидкість печаті 3D принтеру і розраховується за формулою:

$$t_{\text{SLM}} = V/v$$

де, t_{SLM} – час виготовлення деталі шляхом SLM (год);

V – об'єм деталі (см^3);

v – швидкість друку принтера ($\text{см}^3/\text{год}$).

Виходячи з цього оптимізована нервюра надрукується за:

$$t_{\text{SLM}} = 896,07/171 = 5,24 \text{ год.}$$

Для виготовлення однієї топологічно оптимізованої нервюри на обладнанні SLM 800 витратиться 5 годин 14 хв.

3.4 Розрахунок використання енергії для виробництва нервюри на SLM 800

Використання енергії для обладнання SLM розраховується аналогічно обладнанню з ЧПУ, з урахуванням потужності обладнання та часу друку. Коефіцієнт безпосередньої роботи обладнання не враховується, тому що друк виконується з постійним енерговикористанням.

Використання енергії на друк обладнанням SLM:

$$E_{\text{SLM}} = P_{\text{SLM}} \cdot t_{\text{SLM}}$$

де, E_{SLM} – використання енергії на виробництво нервюри технологією SLM (кВт);

P_{SLM} – енерговикористання SLM обладнання (кВт/год);

t_{SLM} – час виготовлення нервюри на SLM обладнанні (год);

Згідно з технічними характеристиками обладнання SLM 800 та результатами розрахунку часу, затраченого на виготовлення нервюри, розрахуємо енергетичні затрати на процес друку нервюри адитивною технологією:

$$E_{\text{SLM}} = 8 \cdot 5,24 = 41,92 \text{ кВт.}$$

Для виробництва топологічно оптимізованої нервюри буде використано 41,92 кВт електроенергії.

3.5 Розрахунок економічних витрат на виробництво нервюри за допомогою SLM 800

За допомогою адитивного виробництва можна знизити більшість добре структурованих, таких як [10]:

- затрати на матеріали – використання адитивної технології, передбачає виробництво деталі з нуля і не передбачає відходів від виробництва, тому можна уникнути затрат на купівлю і доставку заготовок, їх зберігання та утилізацію відходів, як при використанні субтрактивного виробництва;

- затрати на електроенергію – затрати на електроенергію менші або однакові в порівнянні з фрезеруванням на обладнанні з ЧПУ, а також

жертвуючи швидкістю друку, можна досягти зменшення енерговикористання майже в 2 рази.

Адитивна технологія також повністю виключає погано структуровані затрати, такі як:

- помилки пов'язані з людським фактором в процесі виготовлення, тому що участь оператора в процесі друку – мінімізована. До його обов'язків входить увімкнення обладнання, завантаження 3D моделі до програмного забезпечення SLM принтеру та виймання готової деталі з робочої зони принтеру (в разі відсутності SLM HUB). Повністю виключаються помилки, пов'язані з розміщенням, закріпленням заготовки та настроюванням базової поверхні, як при технології фрезерування;
- настроюванням обладнання – до настроювання обладнання входить тільки завантаження моделі в програмне забезпечення обладнання. Операції калібрування робочої поверхні, сканування шарів деталі та виявлення невеликих дефектів з подальшим виправленням в процесі друку, фокусування пучку лазера, швидкість подачі і оновлення інертного газу обладнання виконує самостійно згідно завантаженої 3D моделі;

3.5.1 Розрахунок витрат на робочу силу

Участь оператора в виробництві передбачає час одночасної активності, час незалежної активності і час програмування обладнання. Постійний контроль за роботою обладнання не потрібний, тому до розрахунку включаємо тільки час запуску обладнання та час виймання готової деталі. В час запуску обладнання включено час на заповнення баку металевим порошком та завантаження 3D моделі до програмного забезпечення SLM принтеру.

Таким чином, загальні витрати на оператора при виготовленні деталі за допомогою обладнання SLM можна розрахувати наступним чином:

$$C_{\text{роб.SLM}} = C_{\text{роб/год}} \cdot (t_{\text{запуск SLM}} + t_{\text{демонт.дет.}})$$

де, $C_{\text{роб.SLM}}$ – витрати на зарплатню оператора обладнання SLM (грн.);

$C_{\text{роб/год}}$ – годинна ставка оператора обладнання SLM (грн/год);

$t_{\text{запуск SLM}}$ – час запуску SLM обладнання, який включає час на заповнення баку металевим порошком та завантаження 3D моделі до програмного забезпечення SLM принтеру, $t_{\text{запуск SLM}} = 15 \text{ хв} = 0,25 \text{ год}$;

$t_{\text{демонт.дет}}$ – час демонтажу готової деталі з робочої зони обладнання, включає безпосередньо демонтаж та транспортування готової деталі на склад, $t_{\text{демонт.дет}} = 15 \text{ хв} = 0,25 \text{ год}$.

Згідно з цим час одночасної активності оператора з обладнанням та час налаштування сумарно дорівнює $30 \text{ хв.} = 0,5 \text{ год}$, інший робочий час оператор може використовувати для обслуговування іншого обладнання, таким чином знижується необхідність у великій кількості робітників. Зарплатня оператора обладнання SLM візьмемо рівну зарплатні оператора фрезерного обладнання з ЧПУ, яка складає 18000 грн., при п'ятиденному робочому графіку, за один робочий день оператор отримує 860 грн/день. При 8-часовому робочому дні, погодинна оплата оператору складає $C_{\text{роб/год}} = 107,50 \text{ грн/год}$.

Розрахуємо витрати на зарплатню оператору, для виробництва однієї нервюри:

$$C_{\text{роб.SLM}} = 107,5 \cdot (0,25 + 0,25) = 54 \text{ грн.}$$

3.5.2 Розрахунок витрат на матеріали

Оскільки технологія Selective Laser Melting передбачає виготовлення деталі з нуля, не має потреби в закупівлі заготовки та здачі відходів від виробництва, таких як стружка або обрізки, на переробку. Специфіка технології передбачає використання тільки такої кількості металевого порошку, яка необхідна для виготовлення деталі. Тому в розрахунках витрат на матеріали немає необхідності враховувати ціну заготовки необхідного розміру і типу, металевий порошок певної марки має сталу вартість і не має залежності від типу і розміру. Також в розрахунках не враховуються кошти, які отримані від здачі відходів виробництва на переробку.

Затрати на матеріали при 3D друку на обладнанні SLM розраховують за наступною формулою:

$$C_{\text{мат.SLM}} = M_{\text{дет.}} \cdot C_{\text{пор.}}$$

де, $C_{\text{мат.SLM}}$ – витрати на матеріал, при 3D друку на обладнанні SLM;

$M_{\text{дет.}}$ – маса деталі, яку необхідно виготовити (кг);

$C_{\text{пор}}$ – вартість металевого порошку (грн/кг).

Вартість порошку сплаву 2024-T4, який являється прямим аналогом Д16Т становить $C_{\text{пор.}} = 1150$ грн/кг.

Маса оптимізованої нервюри становить $M_{\text{дет.}} = 2,509$ кг.

Виходячи з цього, затрати на матеріали при 3D друку на обладнанні SLM будуть рівні:

$$C_{\text{мат.SLM}} = 2,509 \cdot 1150 = 2885 \text{ грн } 35 \text{ коп.}$$

3.5.3 Розрахунок витрат на електроенергію

Згідно тарифами для виробничих підприємств в Україні, вартість електроенергії складає 2,86 грн./кВт · год.

Затрати на електроенергію для виготовлення деталі на SLM обладнанні враховують кількість використаної електричної енергії при виготовленні деталі та вартість 1 кВт електроенергії і розраховуються за формулою:

$$C_{\text{енерг.SLM}} = E_{\text{SLM}} \cdot C_{\text{енерг.}}$$

де, $C_{\text{енерг.SLM}}$ – витрати на електроенергію для виготовлення деталі на SLM обладнанні (грн.).

E_{SLM} – енерговикористання під час виготовлення деталі на SLM обладнанні. (кВт);

$C_{\text{енерг}}$ – вартість електроенергії (грн/кВт).

Затрати на електроенергію для виготовлення оптимізованої нервюри на обладнанні вибіркового лазерного плавлення будуть складати:

$$C_{\text{енерг. SLM}} = 41,92 \cdot 2,86 = 119,9 \text{ грн.}$$

3.5.4 Розрахунок загальних витрат

Загальні витрати на виробництво – це сума добре структурованих та погано структурованих затрат.

До погано структурованих затрат відносять настроювання обладнання та помилки складання. Настроювання обладнання не несе за собою прямих економічних витрат та враховане при розрахунку часу виробництва. Помилки складання виникають внаслідок людського фактору при операціях закріплення заготовки та настроювання обладнання, які відсутні при використанні адитивного виробництва. В зв'язку з цим до розрахунку загальних витрат виробництва за допомогою обладнання SLM вірогідність виникнення бракованих деталей не вноситься.

Загальні економічні витрати для технології Selective Laser Melting включають в себе витрати на робочу силу, витрати на електричну енергію, затрати на матеріал для виготовлення деталі (порошок алюмінієвого сплаву) :

$$C_{\text{заг SLM}} = \sum C_{i \text{ SLM}} = C_{\text{роб.SLM}} + C_{\text{мат.SLM}} + C_{\text{енерг.SLM}} = 54 + 2885,35 + 119,9 = \\ = 3059,25 \text{ грн} = 3059 \text{ грн, } 25 \text{ коп.}$$

Для виготовлення однієї нервюри з виконаною оптимізацією топології на обладнанні виробництва SLM Solutions марки SLM 800 буде витрачено 3059 грн 25 коп.

3.6 Порівняння оптимальності виготовлення нервюр за допомогою субтрактивної і адитивної технологій

В процесі аналізу субтрактивної технології було визначено ряд недоліків серед яких:

- 1) Технологічні обмеження виробництва.

Неможливо виготовляти деталі складних форм через велику кількість технологічних обмежень: складність виготовлення оснащення, обмеження форм та можливостей ріжучого інструменту, обмеження можливостей оснащення, складність або неможливість обробки деяких матеріалів.

2) Велика трудомісткість.

Виникає через складність технологічного процесу, зумовлену необхідністю використання великої кількості оснащення для різних типів деталей або навіть декількох видів обладнання для виготовлення однієї деталі. Наприклад, для виготовлення нервюр процесом гарячого штампування, необхідна велика кількість штампів (для кожного найменування нервюр – свій штамп), процес передбачає нагрів заготовки, що зумовлює необхідність використання печей або індукційних нагрівачів для попереднього нагріву заготовок перед штампуванням. Якість поверхні при гарячому штампування може бути низька, що зумовлює необхідність пост-обробки шляхом обрізання зайвого матеріалу та шліфування поверхні. При виготовленні нервюр шляхом фрезерування виникає необхідність у використанні великої кількості різних типів ріжучого інструменту – фрез, сверл та інших. При роботі на обладнанні з ЧПУ необхідна висока точність закріплення заготовки та налаштування базових поверхонь, при неправильності виконання даних операцій може з'являтися велика кількість браку. Цей фактор значно підвищує трудомісткість технологічного процесу.

Також при субрактивному виробництві великий вплив на якість деталей має оператор. На процесах закріплення та базування заготовок можуть виникати помилки, що призводять до браку деталей.

3) Велика кількість відходів від виробництва.

Внаслідок необхідності пост-обробки деталей виготовлених методом штампування, відходи виробництва виникають під час шліфування та обрізання зайвого матеріалу. При фрезеруванні виникає дуже значна кількість відходів у вигляді стружки. В процесі моделювання та розрахунку нервюри визначено, що відсоток відходів становить 87,67% від початкової маси заготовки.

4) Підвищена маса деталей.

Виникає внаслідок технологічних обмежень обладнання – неможливості виготовлення деталей складних форм або деталей з певною товщиною стінки та частковим заповненням її порожнин.

5) Високі затрати на матеріали.

Виникають внаслідок необхідності використання заготовок, які мають збільшену вартість, в зв'язку з необхідністю їх виготовлення. А також утворенням великої кількості відходів, які значно впливають на кінцеві затрати на матеріал. В процесі розрахунку визначено, що економія коштів внаслідок переробки стружки – незначна.

б) Негативний вплив на навколишнє середовище.

При використанні технології гарячого штампування в повітря виділяється безліч токсичних речовин: масляний аерозоль, який утворюється під дією високої температури зі змащувальних матеріалів, продукти згорання змащувальних матеріалів; оксиду вуглецю, сірководню, частинки окалини у вигляді пилу. Виділення значної кількості теплоти. Значний вплив на навколишнє середовище завдає наявність шуму та вібрації. При використанні індукційних нагрівачів утворюються електромагнітні поля.

При використанні технології фрезерування в повітря потрапляють аерозолі емульсолу, масла та металевий пил. Значний вплив на навколишнє середовище завдає необхідність утилізації відходів виробництва, а саме їх переплавки та створення нових заготовок.

Аддитивна технологія дає змогу уникнути більшості негативних факторів субтрактивного виробництва.

Аддитивне обладнання не має технологічних обмежень у створенні геометричних форм, при друкуванні деталей можна створювати різноманітні форми, оптимізуючи топологію деталей та виготовляти порожнисті деталі з частковим заповненням їх порожнин по всьому об'єму. Єдиним обмеженням являються розміри деталей. Топологічна оптимізація дозволяє створити генеративний дизайн деталі та значно знизити масу. В процесі оптимізації нервюри була створена генеративна конструкція нервюри, маса якої на 53,4% нижча за масу початкової нервюри і становить 2,509 кг.

Специфіка технології виготовлення деталей з нуля, тому не передбачає використання заготовок, в якості сировини використовується тільки та кількість

порошку, яка необхідна для виготовлення деталі. Через це виробництво адитивним методом має мінімальну кількість відходів або взагалі їхню відсутність, що значно знижує затрати на матеріали.

Адитивне виробництво має незначну трудомісткість та участь оператора обладнання і як наслідок мінімізує помилки, які виникають у зв'язку з людським фактором. Участь оператора обладнання наявна тільки на етапах завантаження порошку до баку, завантаження моделі до ПЗ станку та демонтажу готової моделі з обладнання.

Негативний вплив на навколишнє середовище також мінімізований. Обране обладнання повторно використовує невикористаний порошок та інертний газ, попередньо очистивши його від токсичних речовин. Токсичні речовини потрапляють до модулю «вічного» фільтру, де покриваються інгібітором і зберігаються в ньому до утилізації.

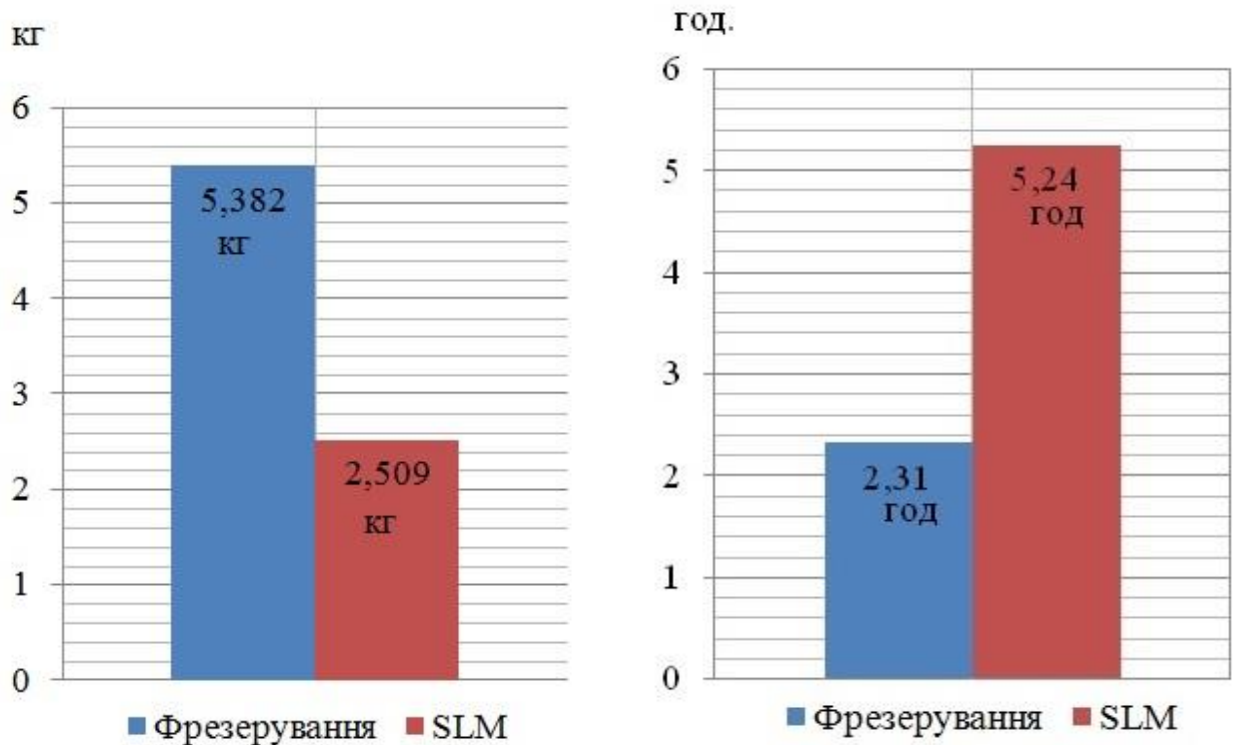
В процесі дослідження виробництва нервюри шляхом фрезерування були розраховані: час виготовлення нервюри, використання електроенергії для виробництва нервюри, затрати на зарплатню робітнику, затрати на електричну енергію, затрати на матеріали, загальні економічні затрати.

В таблиці 3.2 представлена порівняльна характеристика розрахованих значень для виробництва нервюри фрезеруванням на станку з ЧПУ та SLM обладнанні.

Таблиця 3.2 – Порівняння розрахованих значень виробництва нервюри фрезеруванням та на SLM обладнанні

Параметр	Фрезерування	3D - друк
Час виробництва	2,31 год	5,24 год
Використання електроенергії	44,46 кВт	41,92 кВт
Затрати на робочу силу	267 грн.	54 грн.
Затрати на електричну енергію	127,2 грн.	119,9 грн.
Затрати на матеріали	8977,30 грн.	2885,35 грн.
Загальні економічні затрати	9559 грн.	3059,25 грн.

Для візуалізації результатів розрахунку побудуємо порівняльні гістограми маси нервюри, часу виготовлення нервюри, використання електроенергії для виробництва нервюри, затрат на зарплатню робітнику, затрат на електричну енергію, затрат на матеріали, загальних економічних затрат (рисунки 3.15 – 3.17, 3.19).

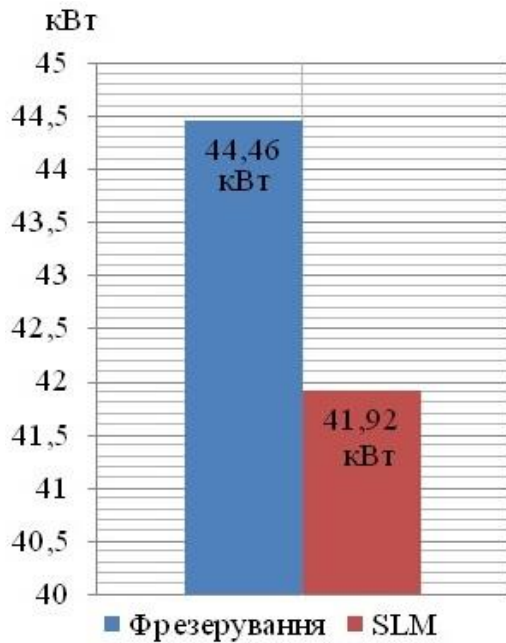


а) – порівняння маси;

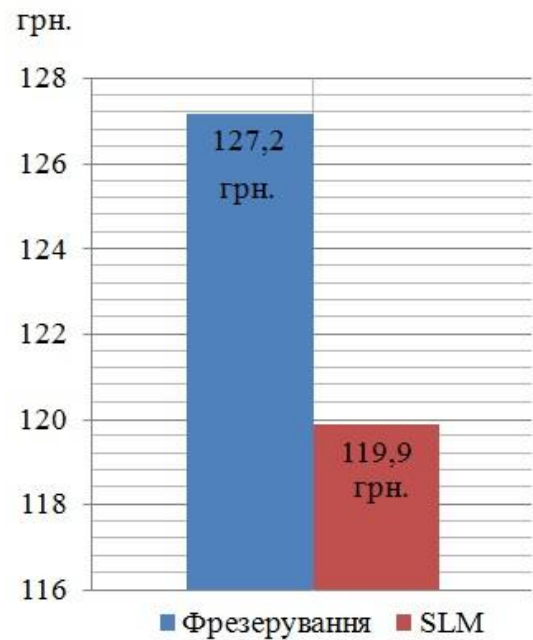
б) – порівняння часу виготовлення

Рисунок 3.15 – Порівняння нервюр шляхом фрезерування та технологією SLM

Зменшення маси повітряного судна в авіаційній галузі має одну з головних ролей. Завдяки зменшенню маси можна досягти забезпечення паливної економічності, зменшення емісії двигунів або збільшення цільового навантаження повітряного судна, що добре впливає на економічні аспекти авіаційної діяльності. На рисунку № а) видно, що топологічно оптимізована нервюра має більш ніж в 2 рази меншу масу. Недоліком технології SLM є більший час виготовлення деталі. Як видно з рисунку № б), час виготовлення нервюри технологією SLM більш ніж в 2 рази довший за виготовлення нервюри фрезеруванням на обладнанні з ЧПУ.



а) – витрати електроенергії



б) – затрати на електроенергію

Рисунок 3.16 – Порівняння витрат електроенергії та грошових затрат на неї

Обладнання для 3D друку металами SLM 800 використовує 8 кВт електроенергії за годину роботи, фрезерний комплекс Haas UMC-1500SS-DUO – 22,4 кВт/год. На рисунку № видно, що в зв'язку з більшим часом роботи SLM 800 для виготовлення нервюри, різниця витрат електроенергії незначна. Використання електроенергії SLM 800 на 2,54 кВт менше за Haas UMC-1500SS-DUO, різниця між витратами на електроенергію відповідно 7,3 грн.

Технологія фрезерування на обладнанні з ЧПУ передбачає широку участь оператора в процесі виготовлення нервюри, пов'язану з настроюванням обладнання, закріпленням та базуванням заготовки, а також постійний контроль за процесом обробки. Участь оператора при виробництві нервюри технологією SLM зводиться до заповнення баку металевим порошком, завантаження 3D моделі до комп'ютеру обладнання та демонтажу готової нервюри з робочої зони обладнання. Тому, як видно на рисунку № а), витрати на зарплатню робітникам при друку деталі на 213 грн. менші ніж при фрезеруванні.

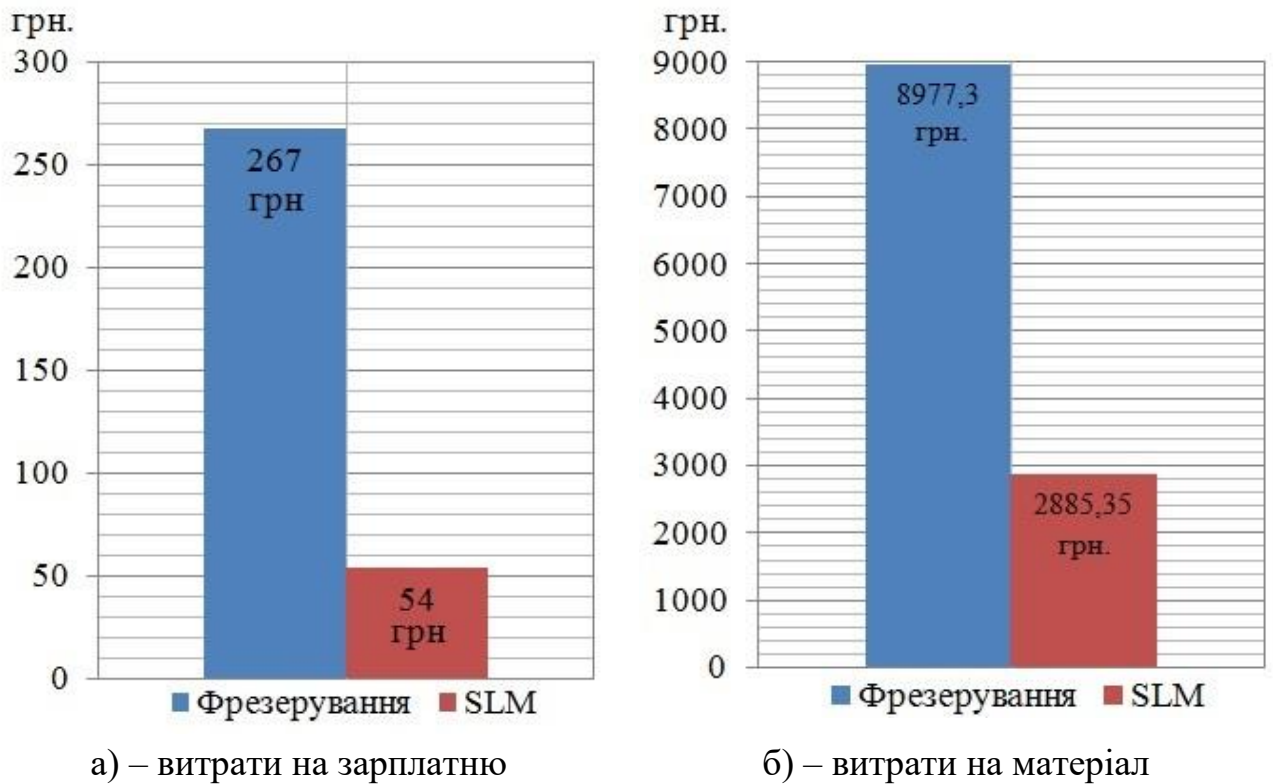


Рисунок 3.17 – Порівняння грошових затрат на зарплатню оператора обладнання та на купівлю матеріалу

Специфіка технології фрезерування передбачає необхідність використання заготовок. Внаслідок обробки утворюється велика кількість відходів від виробництва, а саме металевої стружки. Це тягне за собою великі грошові затрати на купівлю матеріалу. Технологія SLM не передбачає утворення відходів, а використовує тільки таку кількість порошку, яка необхідна для виготовлення деталі, невикористаний порошок використовується повторно для виготовлення нових деталей. Навіть з урахуванням отримання кошт від здачі на переробку металевої стружки, затрати на матеріал при фрезеруванні на обладнанні з ЧПУ більш ніж в 3 рази більші ніж при SLM, різниця затрат рівна на 6091,95 грн.

При фрезеруванні також можуть виникати помилки пов'язані з людським фактором, які призводять браку деталей. Частка браку 2% і врахована при розрахунках загальних витрат. При виробництві деталей на SLM обладнанні, участь оператора мінімізована, тому виникнення бракованих деталей не включається до розрахунків.

Проаналізувавши всі затрати складено відсоткові діаграми розподілення загальних витрат (рисунок 3.18).

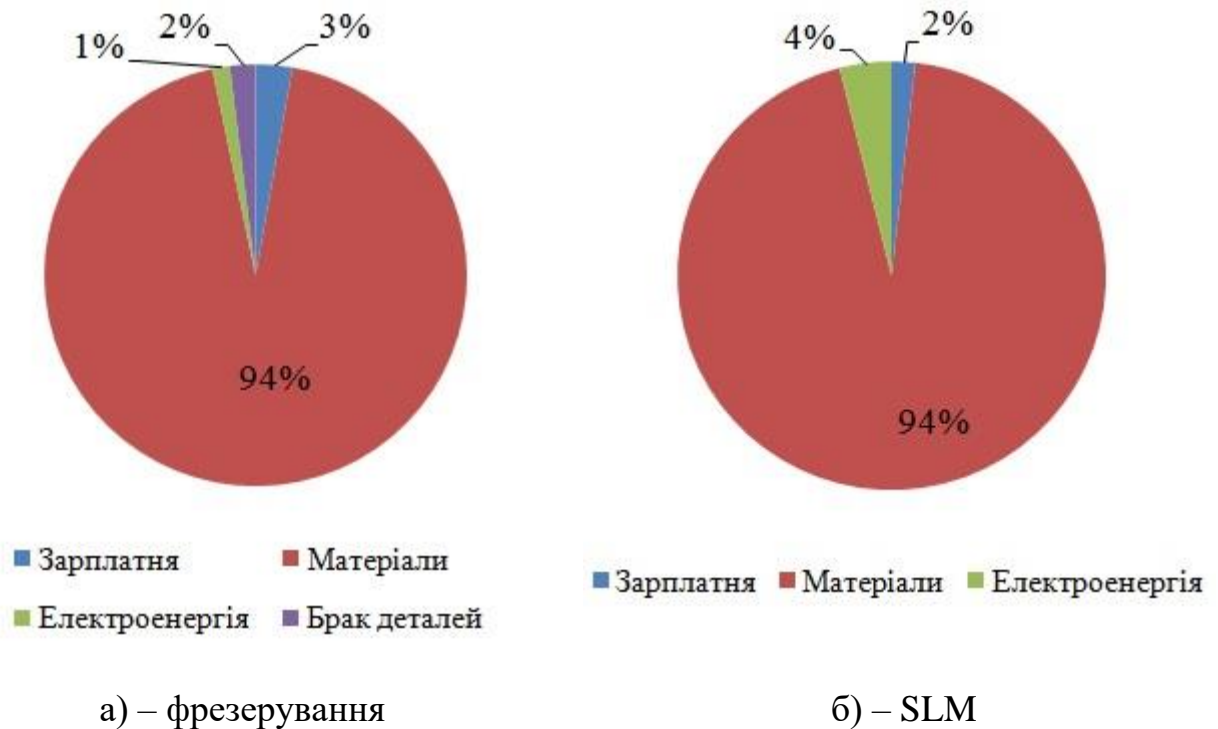


Рисунок 3.18 – Розподілення загальних витрат на виробництво нервюри

З рисунку видно, що основними економічними затратами є затрати на матеріал і для обох технологій становлять 94% від усіх витрат.

При використанні технології фрезерування грошові витрати на електроенергію становлять 1%, на зарплатню – 3%, затрати з причини виникнення браку – 2%. При використанні технології SLM грошові витрати на електроенергію становлять 4%, а на зарплатню – 2%.

На рисунку представлено порівняння загальних затрат на виробництво нервюри шляхом фрезерування на фрезерному комплексі Haas UMC-1500SS-DUO та технологією вибіркового лазерного плавлення на обладнанні SLM Solutions SLM 800. В результаті розрахунків було визначено, що для виготовлення нервюри фрезеруванням на фрезерному комплексі витратиться 9559 грн. Для виготовлення топологічно оптимізованої нервюри шляхом вибіркового лазерного плавлення – SLM, витратиться 3059,25 грн.

Загальні грошові затрати при фрезеруванні перевищують затрати SLM більш ніж у 3 рази, різниця становить 6499,75 грн.

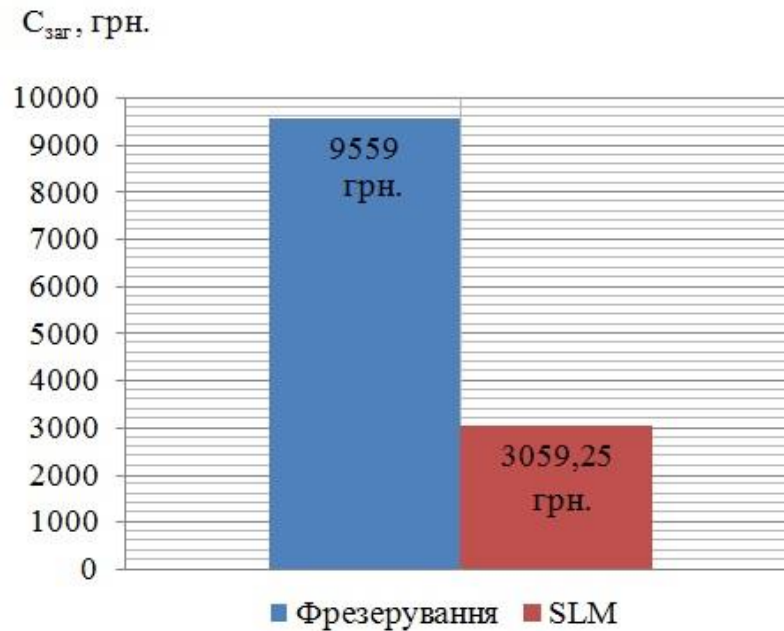


Рисунок 3.19 – Порівняння загальних грошових витрат на виробництво нервюри при фрезеруванні та при SLM друку

Виходячи з розрахунків технологій виготовлення нервюри субтрактивним і адитивним виробництвами і їх аналізу можна виділити основні переваги технології SLM:

- зменшення маси нервюри на 53,4% , завдяки оптимізації топології;
- більш ніж у 3 рази нижча вартість виробництва нервюри.

Завдяки виділеним перевагам можна зробити висновок про підвищення ефективності виготовлення нервюр і як наслідок ефективності складання крила в цілому, завдяки використанню технології SLM.

Висновки до розділу 3

В даному розділі проаналізована адитивна технологія, її типи, їх переваги та недоліки. Також проаналізовані матеріали для виробництва деталей за допомогою адитивної технології. Зроблено висновок, що для виготовлення нервюр з металів найдоцільніше використовувати технологію SLM.

Для зменшення маси нервюри, зі збереженням її міцності, виконана оптимізація топології конструкції. Завдяки їй вдалось зменшити масу нервюри на 53,4%.

Для розрахунку оптимальності виготовлення нервюри шляхом адитивного виробництва, був проаналізований світовий ринок виробників обладнання SLM та обраний станок фірми SLM Solutions моделі SLM 800. Він має безліч переваг перед обладнанням інших виробників.

Розрахований час виготовлення нервюри, він становить 5 год 24 хв. Використання електроенергії складає 41,92 кВт. Також розраховані грошові витрати на зарплатню оператору станку, на електроенергію та матеріали. Технологія мінімізує участь оператора у процесі виробництва, тому виникнення браку виключається і в розрахунках не враховувалась. Загальна сума грошових витрат склала 3059,25 грн.

Зроблено порівняльний аналіз технологій виробництва нервюр фрезеруванням та SLM. Виходячи з нього виділено основні переваги технології SLM: зменшення маси нервюри на 53,4% , завдяки оптимізації топології та більш ніж у 3 рази нижча вартість виробництва нервюри.

Враховуючи ці переваги можна зробити висновок про оптимальність використання адитивної технології, а саме SLM, для виготовлення нервюр крила сучасних літаків. Зниження маси нервюр, а також зменшення вартості їх виробництва призведе до підвищення ефективності складання крил сучасних літаків в цілому.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Небезпечні виробничі фактори процесу 3D друку технологією Selective Laser Melting

Сутність технології Selective Laser Melting полягає у пошаровому повному розплавленні металевих порошків.

Друк відбувається в камері SLM-обладнання, яка заповнюється інертним газом (аргоном або азотом) перед друком. На робочу поверхню подається металевий порошок, який рівномірно розподіляється на ній. Потім за допомогою випромінювання потужного ітербієвого лазера, порошок вибірково, згідно з математичною CAD-моделлю розплавляється утворюючи шари майбутньої деталі.

В зв'язку з цим можна виділити наступні небезпечні виробничі фактори при роботі з SLM-обладнанням:

1) Опіки.

Оператор може отримати опіки тіла в результаті контакту з корпусом обладнання в процесі роботи обладнання, опіки від контакту з готовою деталлю, одразу після закінчення її виготовлення.

2) Ураження внаслідок потрапляння випромінювання лазера.

Для розплавлення шару металу використовують один або декілька ітербієвих лазерів потужністю 400-700 Вт. Навіть не сфокусоване лазерне випромінювання такої потужності може призвести до опікам сітківки ока, часткової або повної втрати зору або до опіків тіла.

3) Ураження електричним струмом.

Обладнання SLM працює від електричного струму напругою 400 В, силою струму 63 А, частотою 50/60 Гц та потужністю 8-10 кВт. Такі показники струму є смертельними для людини.

4) Пожежа.

Може виникнути внаслідок перегріву обладнання або пошкодження електричного кабелю.

5) Контакт оператора з металевим порошком.

При роботі з SLM-обладнанням, в якості сировини для друку деталей використовують спеціальні металеві сплави у вигляді дрібнодисперсних зерен розміром від 4 до 80 мкм. Вони відносяться до видимих частинок (більше 10 мкм) та мікроскопічних (від 0,25 до 10 мкм).

Металічний порошок може стати причиною захворювань шкіри та слизових оболонок таких як: алергічні реакції, дерматити, кон'юнктивіти. Також може стати причиною утворення запальних процесів внаслідок закупорювання пор шкіри та абразивної дії на слизові оболонки.

Потрапляння металічного пилу у дихальні шляхи призводить до ринітів, фарингітів, бронхітів, пневмонії, астми.

Мікроскопічні частинки проникає до глибоких відділів легень до альвеол і затримується там, що може бути причиною металоконіоз. Захворювання розвивається тривалий період. На початку розвитку хвороби проявляються такі симптоми як: сильна задишка, сухий кашель, біль у грудній клітці, бронхіт, втрата ваги, слабкість та апатія. Після розвитку хвороби з'являються: хрипи, дихальна недостатність. На останніх стадіях захворювання спостерігається декомпенсація легеневого серця, що може стати причиною смерті.

б) Отруєння оператора інертними газами (аргоном або азотом).

Дія аргону на організм людини обумовлено його здатністю заповнювати нижні та середні відділи легень, витісняючи кисень, що призводить до гіпоксії органів і тканин організму, а в тяжких випадках викликає приступи напади задухи і летальні випадки. Дія аргону починає проявлятися при його концентрації в приміщенні більше 4% від об'єму повітря. Короткочасне вдихання аргону у високій концентрації (вище 15 % від об'єму повітря) викликає нудоту, блювоту, сухість у носоглотці та очах, може викликати втрату свідомості. При більш тривалому впливі аргону в невеликій концентрації може виникнути сльозотеча, кашель, прискорення серцебиття з одночасним зниженням кров'яного тиску та появою болі у грудній клітині.

Азот не являється шкідливим для людини, він складає 78% від хімічного складу повітря. Але при перевищенні норми азот починає діяти як

анестезуючий засіб, що призводить до стану легкого сп'яніння. Однак, при швидкому виділенні газоподібного азоту в замкнутому просторі, він витісняє кисень і призводить до гіпоксії, людина відчуває сонливість, що може призвести летального випадку від нестачі кисню.

7) Отруєння токсичними парами металів при їх розплавленні.

При розплавленні металічного порошку виділяється безліч небезпечних речовин серед яких:

- оксид вуглеводу – витісняє кисень з гемоглобіну крові, токсично впливає на клітини організму, що призводить до гіпоксії клітин організму;
- формальдегід – отрутна речовина, що викликає подразнення шкіри та слизової оболонки;
- бензол – викликає наркотичну дію на центральну нервову систему, хронічне отруєння може призвести до смерті;
- фенол – отруйна речовина, може всмоктуватися в організм людини через шкіру;
- бензопропілен – канцерогенна речовина, яка викликає генетичні мутації і ракові захворювання.

4.2 Організаційні та конструктивно-технологічні рішення для зниження небезпечних виробничих факторів процесу 3D друку технологією Selective Laser Melting

Для запобігання багатьох небезпечних виробничих факторів в обладнання SLM закладені деякі конструктивно-технологічні рішення.

Для запобігання опіків від контакту з готовою деталлю, обладнання устатковується спеціальними захисними замками робочої зони та пірометром. Замки робочої зони автоматично відкриваються після надходження до них сигналу пірометру про допустиму температуру готової деталі (не більше 40 °C). В разі несправності системи є функція ручного відкриття замків, при цьому процес друку автоматично зупиняється.

Для запобігання ураження оператора внаслідок потрапляння на нього випромінювання лазера обладнання оснащено захистом від відкриття робочої зони, які описані вище. Скло, яке призначене для контролю оператора за процесом виробництва має спеціальне захисне покриття, яке запобігає нанесенню фізичної шкоди оператору під час виконання контролю за процесом.

Для попередження ураження оператора електричним струмом та запобігання виникнення пожежі необхідно забезпечити якісне та правильно розраховане заземлення, перед кожним запуском обладнання проводити огляд електричної проводки та з'єднань на відсутність механічних або температурних пошкоджень. Для захисту від перепадів напруги обладнання оснащено стабілізуючим пристроєм.

Обладнання після закінчення процесу друку деталі самостійно засмоктує невикористаний порошок в спеціальну камеру, який застосовується повторно для виробництва наступних деталей. Контакт з металічним порошком відбувається при заповненні ним розхідної камери. Також при друку деталей, які мають мілкі складні геометричні форми, порошок може бути не повністю видалений обладнанням, тому оператор робить це вручну з застосуванням неметалічного пензля.

Після друку інертний газ автоматично видаляється в вентиляцію через систему фільтрації обладнання, замінюючи його повітрям з виробничого цеху через зворотній клапан. Потрапляння аргону або азоту до виробничого цеху може відбуватися через несправність вентиляції або зворотного клапану.

Процес друку проводиться в герметичній камері в середовищі інертних газів, тому токсичні пари, які виділяються в процесі плавлення металу, разом з інертним газом видаляється в вентиляцію.

Згідно з ГОСТ 12.3.002-75 «Процеси виробничі. Загальні вимоги безпеки» виділимо загальні організаційні рішення для зниження небезпечних виробничих факторів процесу 3D друку [26]:

- проведення огляду та перевірки обладнання перед кожним його запуском;

- проведення своєчасного технічного обслуговування обладнання;
- заборонено торкатися обладнання навколо робочої зони через її значний нагрів;
- заборонено без особливої необхідності відкривати робочу зону обладнання;
- використовувати засоби індивідуального захисту:
 - спецодяг, з довгим рукавом та закритою шиєю, для запобігання контакту порошку з тілом;
 - респіратор для попередження потрапляння металевого порошку, інертних газів та токсичних парів до носової, ротової порожнин та легень;
 - герметичні окуляри для запобігання потрапляння в очі металевого порошку.

В зв'язку з значним впливом на оператора металевого порошку, інертних газів та токсичних парів, які виділяються при розплавленні металу дуже важливим є розрахунок необхідної вентиляції для виробничого цеху.

4.2.1 Розрахунок вентиляції виробничого приміщення з обладнанням для 3D-друку металами

Згідно з ДБНУ В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», у зв'язку з наявністю при виробництві у повітрі металевого порошку, газів аргону або азоту та токсичних парів металу необхідно використовувати приточно-витяжну механічну вентиляцію та місцевий відвід вентиляції з обладнання [27].

Приточно-витяжна вентиляція представляє собою комплекс обладнання, який складається з двох частин: приточної лінії, яка забезпечує забір повітря, підготовку та подачу свіжого повітря до приміщення та витяжної лінії, яка видаляє повітря разом зі шкідливими компонентами.

Для розрахунку вентиляції виробничого приміщення необхідно визначити його площу та об'єм повітря в ній.

Площу виробничого приміщення розраховують за формулою:

$$F_{ц} = K \sum F_{м};$$

де, K – коефіцієнт запасу площі, який залежить від характеру виробництва, наявності транспортних засобів, габаритних розмірів обладнання. Чим менші розміри обладнання, тим вищий коефіцієнт;

$\sum F_{м}$ – сумарна площа, що зайнята технологічним обладнанням, без урахування площі обслуговування, m^2 ;

$F_{ц}$ – площа виробничого цеху, m^2 .

Розмір обраного обладнання SLM solutions 800: довжина – 4 м, ширина 1,25 м, висота – 3,8 м, тобто площа становить $5 m^2$. Для обладнання, межі площі якого становлять $1 \dots 10 m^2$ коефіцієнт запасу площі $K = 4$;

Для виробничого приміщення з одним станком площа буде дорівнювати:

$$F_{ц} = 4 \cdot 5 = 20 m^2.$$

При висоті обладнання 3,8 м мінімальна висота стелі буде становити 5 м, тому об'єм виробничого приміщення рівний

$$V_{ц} = 20 \cdot 5 = 100 m^3$$

Необхідно знайти об'єм повітря, який припадає на одного працюючого. Об'єм повітря рівний об'єму приміщення, так як для одного станка SLM потрібен один оператор, то питомий об'єм повітря який припадає на одного працюючого, в нашому випадку рівний об'єму приміщення $V_{ц} = V_{ц}'$.

Розрахуємо повітрообмін за кратністю. Згідно з ДБНУ В.2.5-67:2013 кратність для виробничих приміщень 3-4, враховуючи наявність шкідливих речовин та виділення тепла від обладнання приймемо $n=4$ [27].

Розрахунок повітрообміну за кратністю проводиться за формулою:

$$L = n \cdot V_{ц} = 4 \cdot 100 = 400 m^3/\text{год},$$

де, L – необхідний повітрообмін;

n – кратність повітрообміну;

$V_{ц}$ – об'єм виробничого приміщення (цеху).

Для розрахунку площі перерізу повітропроводів необхідно знати об'єм повітря, який проходить через повітропровід за одиницю часу, а також максимально допустиму швидкість повітря в каналі. Приймаємо швидкість повітря в повітропроводі $V_{\text{п}} = 5 \text{ м/с}$ [27].

Площа перерізу повітропроводу розраховується за формулою:

$$S_p = L \cdot j / v = 400 \cdot 2,778 / 5 = 222,24 \text{ см}^2$$

де, S_c – розрахункова площа перерізу повітропроводу;

v – швидкість повітря в повітропроводі;

$j = 2,778$ – коефіцієнт для узгодження розмірностей.

Фактична площа згідно з каталогом буде дорівнювати $S = 225 \text{ см}^2$, що відповідає прямокутному профілю каналу з розміром 90x250 мм.

При проектуванні механічної витяжної системи необхідно враховувати щільність речовин, які необхідно видалити. У зв'язку з тим, що металевий порошок, інертні гази та пари металів важче за повітря приймачі повітря доцільно розміщувати в нижній частині виробничого приміщення.

Є широкий вибір приточно-витяжних систем різних виробників. За даними розрахунків та вимогами ГОСТ 12.1.005-88 «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони» була обрана система Salda Ris 400 PE (рисунок 4.1). Дана система має функцію регулювання параметрів, систему рекуперації повітря, підігрів та охолодження повітря.



Рисунок 4.1 – Приточно-витяжна система вентиляції Salda Ris 400 PE

4.3 Вимоги до пожежної безпеки виробничого приміщення з обладнанням для 3D-друку металами

Пожежа при роботі з обладнанням SLM може виникнути внаслідок перегріву обладнання або пошкодження електричного кабелю.

Для попередження пожежі від перегріву, обладнання оснащено термодатчиками, при перевищенні температури за нормативну, виводиться інформація на комп'ютер, повідомляючи оператора про перегрів. Разом з тим обладнання зменшує швидкість друку та підвищує оберти охолоджуючих вентиляторів.

Для попередження виникнення пожежі внаслідок пошкодження електричної проводки, перед початком роботи необхідно:

- оглянути обладнання на відсутність механічних пошкоджень;
- оглянути стан електричної проводки;
- вчасно проводити ТО обладнання, для попередження виходу з ладу системи попередження перегріву.

Виробниче приміщення повинно обладнуватись вогнегасниками. Вогнегасники бувають трьох типів:

1) Повітряно-пінні – призначені для гасіння твердих матеріалів та горючих матеріалів. Вогнегасниками даного типу заборонено гасити речовини, які горять без повітря, лужні метали та об'єкти під напругою.

2) Вуглекислотні – призначені для гасіння матеріалів, які горять тільки при наявності повітря. Не рекомендовано використовувати для гасіння магнію, алюмінію, натрію і калію, а також їх сплавів.

3) Порошкові – призначені для гасіння твердих та рідких речовин, газів та електроустановок, напруга яких не перевищує 1000 В. Даний тип вогнегасників не використовують для гасіння матеріалів, які горять без доступу повітря.

У зв'язку з тим, що головною причиною пожежі є несправність електропроводки, а також виготовленням деталей з різних сплавів включаючи алюмінієві, доцільно використовувати лише порошкові вогнегасники.

Згідно з «Типовими нормами належності вогнегасників» затвердженими міністерством України з питань надзвичайних ситуацій від 2 квітня 2004 року, при площі до 25 м², приміщення повинно обладнуватись одним переносним порошковим вогнегасником з зарядом вогнегасної речовини 8 – 9 кг [29].

У виробничих приміщеннях рекомендується встановлювати датчики диму та датчики тепла.

Принцип роботи датчиків тепла заснований на виявленні ознак пожежі по стрімкому підвищенню температури. Даний вид датчиків в наш час майже не використовується, на заміну ним створені датчики диму.

Принцип роботи датчиків диму зводиться до оцінювання щільності повітря та наявності мілких домішок. Методи аналізу залежать від типу датчика (лінійний, аспіраційний, оптично-електронний, іонізаційний).

Сучасні датчики можуть використовуватись при площі приміщення 80–100 м², тому при площі виробничого приміщення достатньо встановлення одного датчику диму.

4.4 Інструкція з техніки безпеки оператора обладнання для 3D-друку металами

1) Загальні вимоги:

— до роботи допускаються особи, які мають технічну освіту, пройшли кваліфікаційне навчання для роботи на даному обладнанні та пройшли інструктаж з техніки безпеки;

— не допускається робота обладнання при вимкненій системі вентиляції;

— тримати робоче місце в чистоті;

— забороняється захаращувати робоче місце сторонніми предметами;

— забороняється приймати їжу та будь-які напої у виробничому приміщенні;

— суворо дотримуватись загальних правил пожежної безпеки, безпеки при роботі з електрообладнанням та вимог даної інструкції з техніки безпеки оператора обладнання для 3D-друку металами.

2) Вимоги безпеки перед початком роботи:

— перед увімкненням обладнання необхідно його оглянути на відсутність будь-яких пошкоджень;

— перевірити стан електричної проводки;

— перевірити наявність та надійність заземлення обладнання;

— перевірити стан органів керування обладнанням;

— при виявленні будь-яких несправностей, не вмикати обладнання та негайно доповісти керівникові.

— увімкнути вентиляцію та перевірити показники температури та вологості в виробничому приміщенні, температура повинна бути в межах 22–24°C, вологість 40-60%;

— не починати роботу при не нормативних показниках температури та вологості;

— перевірити наявність та правильність марки необхідного металевого порошку для друку;

— при справності обладнання та нормативних показниках мікроклімату у виробничому приміщенні можна приступити до роботи;

3) Вимоги безпеки при роботі обладнання:

— забороняється відкривати робочу зону обладнання в процесі його роботи;

— при наповненні витратної ємності та пост-обробці готової деталі необхідно користуватися засобами індивідуального захисту: спецодягом, з довгим рукавом та закритою шиєю, для запобігання контакту порошку з тілом; респіратором для попередження потрапляння металевого порошку, інертних газів та токсичних парів до носової, ротової порожнин та легень; герметичними окуляри для запобігання потрапляння в очі металевого порошку;

— при всіх виявлених під час роботи несправностях обладнання необхідно одразу докладати керівнику, у випадку поломки обладнання необхідно зупинити роботу до усунення аварійних обставин. При виявленні можливої небезпеки необхідно негайно попередити керівника;

— забороняється самотійно проводити ремонт обладнання;

— забороняється торкатись робочої зони обладнання в процесі друку через її значний нагрів та можливість отримання опіків;

— забороняється самотійно змінювати заводські програмні налаштування, від'єднувати датчики та системи захисту;

— не допускати до обладнання сторонніх осіб, які не беруть участь в роботі;

— забороняється будь-яке фізичне втручання в роботу обладнання, за винятком екстреної зупинки друку або аварійного вимкнення;

— забороняється класти сторонні предмети на принтер або до його робочої зони;

— після закінчення друку деталі, необхідно дочекатись її охолодження, видалення інертного газу з робочої зони обладнання та всмоктування обладнанням невикористаного порошку до спеціальної камери для повторного використання;

4) Вимоги безпеки після закінчення роботи з обладнанням:

— дочекатись повного охолодження обладнання до температури повітря в приміщенні;

— впевнитися в чистоті робочої зони обладнання, при необхідності увімкнути примусове очищення залишків порошку. При необхідності вичистити порошок неметалічним пензлем та увімкнути очищення повторно;

— вимкнути обладнання та систему вентиляцію.

Висновки до 4 розділу

В даному розділі Охорона праці був виконаний аналіз небезпечних виробничих факторів процесу 3D друку технологією Selective Laser Melting серед яких: Опіки, ураження внаслідок потрапляння випромінювання лазера, ураження електричним струмом, пожежа, контакт оператора з металевим порошком та потрапляння його до дихальних шляхів, отруєння оператора інертними газами, токсичними парами металів при їх розплавленні. А також розглянуті наслідки перерахованих факторів.

Розглянуті конструктивно-технологічні рішення закладені в обладнання виробником та запропоновані організаційні рішення для зниження небезпечних виробничих факторів процесу 3D друку технологією Selective Laser Melting.

Одними з найголовніших факторів є контакт оператора з металевим порошком та потрапляння його до дихальних шляхів, отруєння оператора інертними газами, токсичними парами металів при їх розплавленні, у зв'язку з цим зроблено розрахунок необхідної вентиляції і підбір вентиляційної системи для виробничого приміщення з одною одиницею обладнання.

Розроблена інструкція з техніки безпеки оператора обладнання для 3D-друку металами.

5 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5.1 Аналіз впливу на навколишнє середовище виробництва нервюр крила

В розділі I виконаний аналіз методів виробництва нервюр. Монолітні нервюри сучасних літаків зазвичай виготовляють гарячим штампуванням або фрезеруванням. Збірні нервюри складають з окремих деталей: стінки, верхнього та нижнього поясів (для нервюр балочного типу) шляхом заклепкових або зварних з'єднань. Перераховані технології відносять до субтрактивного виробництва.

Нервюри також виготовляють з композиційних матеріалів. Найчастіше використовують полімерні композити, які складаються з матриці та наповнювача. В якості матриці використовують епоксидні, поліефірні та епоксівінілефірні смоли, наповнювачем служать волокна скла, бору та карбону. Нервюри з композитних матеріалів зазвичай виготовляють: методом вакуумної інфузії, технологією рідкого формування та технологією компресійного формування.

При використанні технології гарячого штампування процес складається з окремих технологічних операцій: різання холодних заготовок металу, нагрівання заготовок для штампування та безпосередньо штампування на молотах або пресах. При даному виробництві в повітря виділяється безліч токсичних речовин [30]:

- масляного аерозолю, який утворюється під дією високої температури зі змащувальних матеріалів;
- продуктів згорання змащувальних матеріалів;
- оксиду вуглецю;
- сірководню.

В процесі гарячого штампування деталей в повітря потрапляють частинки окалини у вигляді пилу, їх концентрація в повітрі робочої зони досягає 3,9...4,1 мг/м³ [30].

Специфіка технології передбачає в собі виділення значної кількості теплоти. Інтенсивність теплового опромінення пресів і молотів складає $1,4...2,1$ кВт/м²; біля пультів керування $0,7...1,4$ кВт/м²; у місцях складування виробів – $0,5...1,0$ кВт/м². Перепад температури по висоті виробничого приміщення може складати від 18 °С до 48 °С, на робочих місцях біля пресів і молотів може перевищувати 36 °С при температурі навколишнього середовища 20 °С. Значне виділення теплоти впливає на утворення несприятливих метеорологічних умов в зоні підприємства [2].

Обладнання, яке використовують при виробництві, утворює значну кількість шуму. Основними джерелами шуму є: система «інструмент-заготовка», привід молоту або пресу, пневматична система. Рівень звуку при виробництві досягає позначки $100...110$ дБ, при цьому має високочастотний характер і являється імпульсним, тобто найбільш несприятливим для навколишнього середовища та людини [2].

Ударний характер роботи обладнання зумовлюють виникнення такого несприятливого для навколишнього середовища, як підвищений рівень вібрації. Найбільші значення амплітуди коливання установок можуть досягати $7...8$ мм, фундаменту до $2,5$ мм [2].

При використанні для нагріву індукційних нагрівачів в штампувальних цехах утворюються електромагнітні поля. При індукційному нагріві середня потужність, яка передається від генератора до індуктора складає $15...350$ кВт, напруга 1000 В, частота від $50...30000$ кГц. Напруженість магнітного поля при частоті 50 Гц досягає 800000 А/м [30].

При виробництві нервюр з використанням фрезерувальних станків, відбувається надання деталі необхідних розмірів та обробка поверхні з використанням спеціальних ріжучих інструментів – фрез. Розміщуючи різноманітні фрези та під різними кутами, можна домогтися необхідного ефекту обробки. Характерною особливістю процесів фрезерної обробки є утворення відходів у вигляді твердих частинок – металевої стружки та металевого пилу. При обробці твердих металів використовують змащувально-

охолоджувальні рідини. При їх використанні у повітря надходять викиди у вигляді аерозолів масла та емульсолу [31].

Металевий пи́л, разом з аерозолями масла та емульсолу видаляються з приміщення за допомогою вентиляційних систем на вулицю та шкідливо впливають на навколишнє середовище.

Вода, яка використовується при фрезеруванні для промивання деталей та обробки приміщень, забруднена мінеральними та синтетичними маслами, миючими засобами, металічним пилом і емульгаторами. Вона потрапляє в стоки та з'являється ризик забруднення ґрунтових вод. Концентрація металевого пи́лу в стічній воді може сягати 20 г/л [31].

Процес фрезерування передбачає в собі видалення лишнього матеріалу для формування необхідної геометричної форми виробу. Весь видалений матеріал у вигляді стружки являється відходами виробництва, їх відсоток може сягати 90%.

В розділі 2 даної роботи була побудована 3D модель монолітної силової нервюри крила та розрахована заготовка у вигляді плити необхідна для виготовлення нервюри. Було встановлено, що маса нервюри складає 5,382 кг, а маса заготовки 43,64 кг, тобто в процесі обробки утворюється 38,258 кг, що становить 87,67% від початкової маси заготовки.

Специфіка утворення великої кількості відходів від фрезерування несе за собою додатковий вплив на навколишнє середовище пов'язаний із [32]:

- Транспортуванням.

Транспортування заготовок до виробництва, маса яких перевищує масу готових деталей, що несе за собою збільшення витрат палива та відповідно викидів від його згорання в атмосферу. А також зворотне транспортування металічної стружки на повторну переробку.

- Енергозатрати на повторну переробку металічної стружки.
- Викиди токсичних речовин в навколишнє середовище безпосередньо від переплавки металічної стружки.

Утилізація металевих нервюр після закінчення їх ресурсу зводиться до їх переплавки та виготовлення нових деталей.

При виготовленні деталей з композитних матеріалів негативний вплив на екологію має матриця, в якості якої використовують епоксидні, поліефірні та епоксівінілефірні смоли [4]. В процесі полімеризації вони виділяють токсичні речовини, а саме:

- епоксидна – епіхлоргідрин, пари реагентів для вулканізації амінів;
- поліефірна – стирен, диметиланілін;
- епоксівінілефірна – альдегідний мономер, фенол, епіхлоргідрин [33].

Готові деталі в процесі експлуатації не наносять шкоди для навколишнього середовища, але гостро стоїть питання утилізації після закінчення їх ресурсу, адже вони мають високу стійкість від впливу навколишнього середовища [33].

Всі способи утилізації полімерних композитних матеріалів можна розділити на:

1) Фізичні:

▪ Механічний – відносять подрібнення та перетирання, в результаті яких отримують продукт утилізації – рециклат різної ступені подрібнення. Перевагами даного методу є: простота технологічного процесу; універсальність (за допомогою даного методу утилізувати будь-які ПКМ); одночасна переробка матриці та наповнювача; відсутність шкідливих викидів; можливість використання рециклата для виготовлення мало навантажених конструкцій, наприклад елементів інтер'єру літака. До недоліків можна віднести складність регулювання розмірів переробленого матеріалу та обмежене повторне використання переробленого матеріалу [34].

▪ Радіаційний – основний принцип заснований на деструкції полімерної матриці під дією високоенергетичного випромінювання. Перевагами радіаційного методу є: універсальність, а також можливість відділення матриці від наповнювача – під дією випромінювання відбувається деструкція

полімерної матриці, а наповнювач залишається цілим і може використовуватися для виготовлення нових деталей. Головним недоліком даного методу є радіаційне навантаження на навколишнє середовище і людей, а також можливість переробки переважно тонких виробів [34].

2) Хімічні:

- Термокатализ – переробка ПКМ під високим тиском та при температурі близько 400 °С, при якій матриця відділяється від наповнювача. Перевагою даного методу є те, що продуктом переробки полімерної смоли – матриці, являється деполімеризована смола, яка може бути використана для повторного виробництва матриці та можливість повторного використання наповнювача. Серед недоліків можна виділити складність технології та наявність значної кількості викидів токсичних речовин на навколишнє середовище в процесі утилізації, необхідність утилізації реагентів [35].

- Сольволіз – вид термокаталізу, особливістю якого є використання в якості середовища різноманітні рідини (надкритична вода, спирти) з каталізаторами – солями лужних металів для деполімеризації матриці [35].

- FBR-метод – окислення в псевдо розрідженому шарі (fluidized bed process). Сутність технології заключається в тому, що у ванну наповнену твердим дисперсним матеріалом (наприклад піском), розміщують ПКМ, а потім подають гарячий газ (450 °С – 550 °С), який збагачений киснем. Нагрітий газ проходить через шар піску, який окислює полімеризовану смолу, потім гарячий повітряний потік уносить волокна і продукти окислення із зони реакції [35].

3) Термічні:

- Спалювання – проводиться при вмісті кисню, який близький або перевищує стехіометричний тиск. Метод спалювання ПКМ – це процес його ліквідації. Єдиним корисним продуктом, який може бути використаним в процесі утилізації – це тепло, тому цей вид переробки вважається недоцільним. Крім того, спалювання призводить до значних викидів токсичних речовин в навколишнє середовище, тому являється забороненим у більшості європейських країнах [34].

- Газифікація – проводиться при недостатчі кисню. Це процес переробки ПКМ з отримання синтез-газу, який використовують для виробництва теплової та електричної енергії. Недоліками, як і у випадку спалювання, є повне знищення компонентів ПКМ і значна кількість викидів токсичних речовин у навколишнє середовище [34].

- Піроліз – проводиться при відсутності кисню, часто в середовищі інертного газу – азоту. На даний момент піроліз – найпоширеніший метод утилізації ПКМ. Піроліз умовно поділяють на низькотемпературний (300 °C – 500 °C), середньо температурний (500 °C – 800°C) та високотемпературний (800°C – 1500°C). Продуктами низькотемпературного піролізу є: волокно, а також масла і тверді речовини – продукти розпаду полімерної матриці. Продуктами середньо температурного піролізу є: волокно, масла і газу та невелика кількість твердих речовин. Продуктами високотемпературного піролізу є: волокно і газу, кількість твердих речовин і масел – незначна. Перевагами піролізу являться високий вихід волокон при оптимізованому процесі, використання теплоти від розкладання полімеру, універсальність обладнання, непогана адгезія смоли до перепрацьованих волокон. До недоліків можна віднести нерівномірність прогріву робочої зони реактору і як наслідок неповний розклад матриці, а також необхідність знешкодження піролізних газів, які містять сполуки небезпечних речовин [34].

5.2 Заходи щодо зменшення негативного впливу визначених факторів

У ході розгляду впливу технологій виробництва та утилізації металевих та композитних нервюр на навколишнє середовище, виявлено що композитні нервюри мають ряд переваг. Менша маса деталей і як наслідок всього літака, сприятливо впливає на емісію двигунів. Викиди небезпечних речовин відбуваються тільки в процесі полімеризації смоли та обробки готової деталі. Також є широкий спектр методів їх утилізації з можливістю повторного використання матеріалів. Але враховуючи складні геометричні форми, наявність отворів для кріплення та технологічних вирізів для кріплення

трубопроводів, електропроводки та іншого, що знижують міцність виробу. Несприятливим фактором також є необхідність чіткого визначення напрямлення волокон в залежності від напрямку сил, які діють на деталь. Ці фактори роблять виробництво нервюр з композитних матеріалів дуже складним та часто навіть недоцільним.

Тому прийнято рішення оптимізації виробництва металевих нервюр з урахуванням екологічних аспектів. В ході аналізу технологій найпоширеніших субтрактивних технологій виробництва нервюр з металевих сплавів – гарячого штампування та фрезерування можна виділити наступні основні несприятливі для навколишнього середовища чинники:

1) Відходи виробництва.

При використанні технології фрезерування може утворюватися до 90 % відходів у вигляді металевої стружки.

2) Вплив токсичних речовин на якість повітря, води та землі.

При використанні цих технологій в навколишнє середовище надходять металевий пил та окалина, оксиди вуглецю, сірководень, продукти згоряння змащувальних матеріалів, аерозолі масла та емульсолу.

3) Величезна потреба в енергії.

Для гарячого штампування енергія витрачається на різання холодних заготовок металу, нагрівання заготовок для штампування та на роботу молотів або пресів. Також необхідно враховувати енергію, яка витрачається на виробництво великої кількості штампів, окремих для кожного типу деталі.

При фрезеруванні значна енергія витрачається на переробку відходів від виробництва.

4) Неоптимальні конструкції.

Конструктивні форми обмежуються технологічними чинниками субтрактивного виробництва, що призводить до створення деталей високої маси та утворення значної кількості відходів.

Всі вище наведені чинники можна знизити або взагалі виключити за допомогою використання адитивної технології виробництва.

Сутність адитивного виробництва полягає, не у видаленні непотрібного матеріалу з заготовки, а створення деталі з нуля шляхом укладання ультратонких шарів матеріалів один на одного за допомогою спеціального обладнання для 3D-друку металами технологією SLM. В якості сировини використовується металевий порошок, який сплавляється під дією випромінювання лазера у необхідних місцях, згідно з комп'ютерною 3D-моделлю. Невикористаний металевий порошок після завершення друку автоматично здувається стиснутим повітрям до спеціальної камери обладнання, залишаючи об'єкт з гладкою поверхнею, яка зазвичай вимагає невеликої подальшої обробки або взагалі не вимагає її. Залишки порошку використовують для виготовлення наступних деталей. Ця специфіка адитивної технології дозволяє мінімізувати відходи до показника менш ніж 1%. За рахунок цього знижуються викиди пов'язані з транспортування більшої за необхідну масу заготовок, зворотне транспортування відходів від виробництва, а також викиди від безпосередньо переплавки відходів [36].

В процесі виготовлення деталей відсутні операції змащування та охолодження за допомогою спеціальних змащувально-охолоджувальних рідин, тому випари та аерозоль масла або емульсолу відсутній. Перед друком в герметична камера, яка являється робочою зоною друку деталей, заповнюється інертним газом аргоном або азотом, тому окалина під час розплавлення шарів металу не утворюється [31].

В процесі друку, за рахунок розплавлення металу може утворюватись безліч токсичних речовин:

- оксид вуглеводу – витісняє кисень з гемоглобіну крові, токсично впливає на клітини організмів, що призводить до їх гіпоксії;
- фенол – отруйна речовина, може всмоктуватися в організм людини через шкіру;

- формальдегід – відноситься до канцерогенів, може утворювати вибухонебезпечні суміші у повітрі, у людини викликає подразнення шкіри та слизової оболонки;
- бензол – виведення з навколишнього середовища може тривати від декількох годин до кількох діб, у людини викликає наркотичну дію на центральну нервову систему, хронічне отруєння може призвести до смерті;
- бензопропілен – канцерогенна речовина, яка викликає генетичні мутації і ракові захворювання.

Для мінімізації викидів у атмосферу цих речовин обладнання оснащено системою фільтрації, де токсичні речовини покриваються інгібітором і зберігаються до утилізації.

Основними джерелами шуму є: система «інструмент-заготовка» та приводи. Технологія не передбачає безпосереднього контакту обладнання із заготовкою, для переміщення лазера використовуються шагові електродвигуни двигуни, а сама робоча зона герметично закрита, тому утворення шуму від роботи обладнанні має показник, нижчий ніж у випадку штампування або фрезерування [31].

Обладнання SLM має відносно невелике енерговикористання. Основним споживачем обладнання SLM є ітербієвий лазер. Обране в даній роботі обладнання оснащено, для зменшення часу виготовлення нервюри, чотирма лазерами потужністю 700 Вт кожен. Сумарне використання електричної енергії обладнанням складає 8 кВт/год, що еквівалентно 4 праскам або 3-4 електрочайникам.

Специфіка технології не має технологічних обмежень у створенні деталей, окрім їх розмірів, що дозволяє виготовляти деталі складних геометричних форм. Створити найвигіднішу конструкцію деталі можна за допомогою оптимізації топології.

Оптимізація топології або генеративний дизайн – це ітеративний процес проектування, який генерує найкращу можливу форму на основі вказаної

проектувальником інформації, такої як: навантаження, обмеження, граничні умови та виробничі засоби керування.

Ціллю дослідження топології – підвищити конструктивну ефективність окремої деталі або всього складання без необхідності жертвувати функціональністю через виробничі обмеження.

Це дослідження дозволяє знижувати або підвищувати різні характеристики деталей або складань такі як маса, об'єм деталі, загальна енергія деформації, зміщення окремих вузлів, взаємне переміщення вузлів, напруження елементів.

Утилізація деталей, виготовлених за даною технологією, зводиться до їхньої переплавки та виготовлення нових деталей або сировини для повторного 3D-друку.

В процесі виконання дипломного проекту була виконана оптимізація силової нервюри крила і виконане порівняння з вихідною нервюрою, яка виготовляється за допомогою фрезерування на станках з ЧПУ. При заданих навантаженнях маса оптимізованої нервюри знижена на 53,4% і становить 2,509 кг та адаптована для 3D-друку металами. Що позитивно впливає на всі аспекти пов'язані зі зменшенням впливу на охорону навколишнього середовища таких як:

- зменшення кількості необхідної сировини для виробництва нервюри;
- повне виключення відходів виробництва та необхідності їх переробки;
- зменшення використання енергії;
- зменшення викиду токсичних речовин;
- зниження рівня шуму;

При зниженні маси літака на 1 кг, економія пального складе приблизно 40 грам палива за 1 годину польоту [37].

Тобто виготовлення пари розглянутих нервюр (для лівої і правої консолей крила) дозволить зменшити витрати пального на 230 г за 1 годину польоту. При нальоті літака 1000 год/рік економія складе 230 кг пального.

Висновки до 5 розділу

В даному розділі розглянуті екологічні питання технологій виробництва металевих нервюр – методу гарячого штампування та фрезерування, а також технологій виготовлення нервюр з композитних матеріалів.

При використанні технології гарячого штампування в повітря виділяється безліч токсичних речовин: масляного аерозолу, який утворюється під дією високої температури зі змащувальних матеріалів; продуктів згорання змащувальних матеріалів; оксиду вуглецю; сірководню; частинок окалини у вигляді пилу. Специфіка технології передбачає в собі виділення значної кількості теплоти, що впливає на утворення несприятливих метеорологічних умов в зоні підприємства. Обладнання, яке використовують при виробництві, утворює значну кількість шуму та підвищений рівень вібрації. При використанні для нагріву індукційних нагрівачів в штампувальних цехах утворюються електромагнітні поля.

При виробництві нервюр з використанням фрезеруванням у процесі обробки утворення відходів у вигляді твердих частинок – металевої стружки та металевого пилу, відсоток яких може складати 90%. При обробці твердих металів використовують змащувально-охолоджувальні рідини. При їх використанні у повітря надходять викиди у вигляді аерозолів масла та емульсолу. Вода, яка використовується при фрезеруванні для промивання деталей та обробки приміщень, забруднена мінеральними та синтетичними маслами, миючими засобами, металічним пилом і емульгаторами, потрапляє в стоки та з'являється ризик забруднення ґрунтових вод.

При виготовленні деталей з композитних матеріалів негативний вплив на екологію має матриця, в якості якої використовують епоксидні, поліефірні та епоксівінілефірні смоли. В процесі полімеризації вони виділяють токсичні речовини: епіхлоргідрин, пари реагентів для вулканізації амінів, стирен, диметиланілін, альдегідний мономер, фенол. Готовий виріб не токсичний для навколишнього середовища, проте його складно утилізувати. Розглянуті методи утилізації ПКМ які поділяють на: фізичні (механічний, радіаційний),

хімічні (термокаталіз, сольволиз, FBP-метод) та термічні (спалювання, газифікація, піролиз).

Запропонована технологія виготовлення нервюр за допомогою SLM, яка має ряд переваг в порівнянні з існуючими технологіями виготовлення металевих нервюр. Серед переваг можна виділити: низький рівень відходів виробництва (менш ніж 1%); зниження викидів токсичних речовин за рахунок фільтраційної системи, якою оснащене обладнання; відсутність аерозолу масла та емульсолу; низький шум від обладнання; низьке енерговикористання.

Серед переваг необхідно виділити можливість створення деталей складних геометричних форм, що дозволяє оптимізувати конструкцію знижуючи або підвищуючи різні характеристики деталей або складань, наприклад таких як маса, об'єм або міцність. Маса оптимізованої нервюри зменшилась на 53,4%. Зниження маси літака позитивно відобразиться на витратах пального, а отже і на емісію їх двигунів в процесі експлуатації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У зв'язку з тим, що крило – одна з основних частин літака, його маса становить 30...50% загальної маси планера літака, обрана тема «Підвищення ефективності складання крил сучасних літаків».

Проаналізована конструкція кесонного крила, його конструктивно-силових елементів, методи їх виготовлення, а також методи остаточного складання крила та стикування консольних частин з центропланом. Зроблено висновок про широкий вибір технологій для виробництва лонжеронів, стрингерів, обшивок крила, його остаточного складання та стикування консольних частин до центроплану, які можуть задовольнити потреби авіабудівних підприємств відповідно до об'ємів випуску, розмірів деталей та бюджету виробництва.

Винятком являються як металеві, так і композитні нервюри крила. Через складність геометричних форм та жорстких вимог, які пред'являються до точності їх виготовлення. Всі описані технології виготовлення металевих нервюр відносяться до субтрактивного виробництва і не задовольняють всіх вимог авіабудівних підприємств, тому прийнято рішення оптимізації їх виробництва шляхом впровадження адитивного виробництва.

Для порівняльного аналізу виробництва нервюри субтрактивною та адитивною технологією, була проаналізована конструкція бортової нервюри консолі крила літака Ан-148 та створена її 3D модель. Для розрахунку оптимальності виготовлення нервюри шляхом фрезерування був проаналізований світовий ринок виробників фрезерного обладнання з ЧПУ та обраний п'яти-координатний фрезерний комплекс американської фірми Haas UMC-1500SS-DUO. Визначено, що в результаті обробки утворюється 87,67% від початкової маси заготовки. Розрахований час виготовлення нервюри, який становить 2 год 18 хв 32 с. Використання електроенергії складає 44,46 кВт. Також розраховані грошові витрати на зарплатню оператору станку, на електроенергію та матеріали, а також враховані втрати коштів при виникненні браку. Загальна їх сума склала 9559 грн.

Проаналізована адитивна технологія, її типи, їх переваги та недоліки. Зроблено висновок, що для виготовлення нервюр з металів найдоцільніше використовувати технологію SLM.

Для зменшення маси нервюри, зі збереженням її міцності, виконана оптимізація топології конструкції. Завдяки їй вдалось зменшити масу нервюри на 53,4%. Для розрахунку оптимальності виготовлення нервюри шляхом адитивного виробництва, був проаналізований світовий ринок виробників обладнання SLM та обраний станок фірми SLM Solutions моделі SLM 800.

Розрахований час виготовлення нервюри, він становить 5 год 24 хв. Використання електроенергії складає 41,92 кВт. Також розраховані грошові витрати на зарплатню оператору станку, на електроенергію та матеріали. Технологія мінімізує участь оператора у процесі виробництва, тому виникнення браку виключається і в розрахунках не враховувалась. Загальна сума грошових витрат склала 3059,25 грн.

При проведенні порівняльного аналізу технологій виробництва нервюр фрезеруванням та SLM, виділено основні переваги технології SLM: зменшення маси нервюри на 53,4%, завдяки оптимізації топології та більш ніж у 3 рази нижча вартість виробництва нервюри.

В розділі про охорону праці, був виконаний аналіз небезпечних виробничих факторів процесу 3D друку технологією Selective Laser Melting, розглянуті конструктивно-технологічні рішення закладені в обладнання виробником та запропоновані організаційні рішення для зниження небезпечних виробничих факторів процесу 3D друку технологією Selective Laser Melting.

Одними з найголовніших факторів є контакт оператора з металевим порошком та потрапляння його до дихальних шляхів, отруєння оператора інертними газами, токсичними парами металів при їх розплавленні, у зв'язку з цим зроблено розрахунок необхідної вентиляції і підбір вентиляційної системи для виробничого приміщення з одною одиницею обладнання. Розроблена інструкція з техніки безпеки оператора обладнання для 3D-друку металами.

В розділі про охорону навколишнього середовища розглянуті екологічні питання технологій виробництва металевих нервюр – методу гарячого штампування та фрезерування, а також технологій виготовлення нервюр з композитних матеріалів. Виділено безліч негативних факторів субтрактивних технологій виробництва нервюр, серед яких: виділення токсичних речовин у навколишнє середовище, виділення значної кількості теплоти, утворення значної кількості шуму та вібрації, велика кількість відходів виробництва. Також розглянутий вплив на навколишнє середовище виробництва композитних деталей, а також методи їх утилізації.

Технологія виготовлення нервюр за допомогою SLM, має ряд переваг в порівнянні з існуючими технологіями, серед яких: низький рівень відходів виробництва або взагалі їх відсутність, зниження викидів токсичних речовин за рахунок фільтраційної системи, якою оснащене обладнання, відсутність аерозолу масла та емульсору, низький шум від обладнання. Також за рахунок зменшення маси оптимізованої нервюри на 53,4% позитивно відобразиться на витратах пального, а отже і на емісію їх двигунів в процесі експлуатації.

Враховуючи всі розглянуті переваги можна зробити висновок про оптимальність використання адитивної технології, а саме SLM, для виготовлення нервюр крила сучасних літаків. Зниження маси нервюр, а також зменшення вартості їх виробництва призведе до підвищення ефективності складання крил сучасних літаків в цілому.

СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойко А. П., Мамлюк О. В., Терещенко Ю. М., Цибенко Р.Т. Конструкція літальних апаратів. – К.: Вища освіта, 2001. – 383 с.
2. Житомирський Г.И. Конструкция самолетов. – М.:Машиностроение, 1991. – 400 с.
3. Гриценко І.А., Животовська К.А., Король В.М., Мамлюк О.В., Терещенко Ю.М. Технологія виробництва ЛА, Книга .– К.: Вища освіта, 2004. – 448 с.
4. Гриценко І.А., Волянська Л.Г., Животовська К.А., Король В.М., Кудрін А.П., Терещенко Ю.М. Технологія виробництва ЛА, Книга 1. – К.: Вища освіта, 2006. – 448 с.
5. Гончаренко В.В., Коваленко І.В. Технологія композиційних матеріалів: Навчальний посібник. – К.:2007.– 131 с.
6. Приводная технология KUKA omniMove: неограниченная маневренность. URL: <https://www.kuka.com/ru-ru/kuka-omnimove>.
7. Самолет Ан-148-100. Стандартная спецификация. – К.: АНТК им. Антонова, 2004. – 489 с.
8. Самолет Ан-148-100. Руководство по технической эксплуатации. Раздел 57. Крыло. – К.: АНТК им. Антонова, 2006. – 238 с.
9. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение): Справочник. – К: КОМИНТЕХ, 2005. – 365 с.
10. Douglas S., Thomas, Stanley W. Gilbert. Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. NIST Special Publication 1176. Gaithersburg, MD: U.S. Dept. of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2014
11. Josage Chathura Perera. Sustainability-Based Expert System for Additive Manufacturing and CNC Machining: Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports, West Virginia University, 2020.
12. V.Нарон, Y.Теплык, M.Туз. Additive technology in aircraft manufacturing, Proceedings of the National Aviation University, vol.3 (84), 2020.

13. General Electric: What is Additive manufacturing?, URL: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
14. Попадюк С.С., Аддитивное производство и 3D-печать: что нужно знать в первую очередь, IQB technologies, 2019 URL: <https://blog.iqb.ru/additive-manufacturing-basics/>
15. Кудряшов Н., Технология селективного лазерного плавления (SLM), IQB technologies, 2020 URL: <https://blog.iqb.ru/slm-technology/>
16. Кудряшов Н., 5 особенностей металлических порошков для 3D-печати, IQB technologies, 2020 URL: <https://blog.iqb.ru/metals-for-3d-printing/>
17. Thomas, Douglas, Economics of the U.S. Additive Manufacturing Industry. NIST Special Publication 1163. Gaithersburg, MD: U.S. Dept. of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2013
18. Wohlers, T., Caffrey, T. Wohlers report 2015: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report, 2015
19. NASA, Industry Test Additively Manufactured Rocket Engine Injector, Release 13-210, 2013 URL: <https://www.nasa.gov/press>,
20. General Electric, Fit to Print: New Plant Will Assemble World's First Passenger Jet Engine With 3D Printed Fuel Nozzles, Next-Gen Materials, press-release June 23, 2014. URL: <https://www.ge.com/news/reports/fit-to-print>
21. GE Aviation invests in widespread rollout of GE Additive Arcam EBM technology to support GE9X blade production, GE press-release June 20, 2019 URL: <https://www.ge.com/additive/press-releases/ge-aviation-invests-widespread-rollout-ge-additive-arcam-ebm-technology-support-ge9x>
22. GE jet-engine bracket challenge results, URL: <https://grabcad.com/challenges/ge-jet-engine-bracket-challenge/results>
23. David Herruzo Moral. Manufacturing process optimization of an airplane wing rib by using additive manufacturing: Bachelor Thesis, Univesidad Carlos III de Madrid, 2019
24. Berger, R., Additive Manufacturing–Next Generation: Roland Berger GmbH, Frankfurt, Germany, 2016.

25. URL: www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-800/.
26. ГОСТ 12.3.002-75 «Процеси виробничі. Загальні вимоги безпеки».
27. ДБНУ В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».
28. ГОСТ 12.1.005-88 «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони».
29. НАПБ Б.03.001-2004 «Типові норми належності вогнегасників».
30. М.В. Сторожев. Ковка и объемная штамповка стали. Справочник. Том 1. – М.: Машиностроение, 1967.
31. Henri Paris, Hossein Mokhtarian, Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2016
32. Jeremy Faludi, Comparing Environmental Impacts of Additive Manufacturing vs. Traditional Machining via Life-Cycle Assessment, Rapid Prototyping Journal, 2015
33. Заикин А.И. Практикум по технологии переработки и испытаниям полимеров и композиционных материалов. М.: Колос-с, 2011 –191 с.
34. А. В. Петров, М. С. Дориомедов, Технологии утилизации полимерных композиционных материалов, Труды ВИАМ №8, 2015.
35. Пахаренко В.А., Яковлева Р.А., Пахаренко А.В. Переработка полимерных композиционных материалов. – К. : Воля, 2006. – 552 с.
36. Karel Kellens, Raya Mertens, Dimos Paraskevas, Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing?, Procedia CIRP, 2017
37. В.А. БЕЛКИН, К проблеме повышения топливной эффективности гражданских самолетов, Научный вестник МГТУ ГА № 219, 2015.