

Хмельницький національний університет

Факультет: інженерії транспорту та архітектури

Кафедра: Технології машинобудування

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

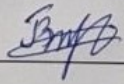
до дипломної роботи магістра

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

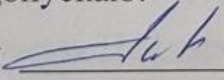
на тему: Розроблення технології виготовлення тонкостінних деталей

ТЕМ-рупора пеленгаційної антени

Виконав студент групи ПМТм-21-1  (В.І. Бернацький)

Керівник магістерської роботи:  (В.П. Ткачук)

До захисту допускаю:

Зав. кафедри  (В.П. Ткачук)

27 12 2022_р.

Хмельницький – 2022 р.

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії транспорту та архітектури
Кафедра Технології машинобудування
Спеціальність «Прикладна механіка»

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ
ДИПЛОМНУ РОБОТУ

магістру Бернацькому Володимирі Івановичу

Тема затверджена наказом ректора

№ 83 від " 1 липня " 2022 р.

Тема роботи: Розроблення технології виготовлення тонкостінних деталей

ТЕМ-рупора пеленгаційної антени

План роботи і терміни подання окремих розділів

Розділ I _____ 30.09.2022

Розділ II _____ 30.10.2022

Розділ III _____ 20.11.2022

Розділ IV _____ 10.12.2022

Розділ V _____ 15.12.2022

Перелік графічних матеріалів: 1. Конструкції пеленгаційних антен 1 лист – А1; 2. Математична модель ТЕМ-рупора 1 лист – А1; 3. Деталь плата 1 лист – А2; 4. Кресленик РТК 1 лист – А1; 5. Створення програми в САМ Esprit 1 лист – А1; 6. Кресленик верстатного пристрою 1 лист – А1; 7. Дослідницький 2 листи - А1; 8. Кресленик інструменту фреза 1 лист – А1.

Зав. кафедри _____ В.П. Ткачук

Керівник _____ В.П. Ткачук

Магістр _____ В.І. Бернацький

Анотація

Тема роботи: Розроблення технології виготовлення тонкостінних деталей
ТЕМ-рупора пеленгаційної антени

Пояснювальна записка містить 81 сторінку і додатки (специфікації складальних креслень, комплект технологічної документації), графічна частина проекту складається з 9 листів формату А1.

Згідно із завданням необхідно було розробити технологію виготовлення тонкостінних плат ТЕМ-рупора із фольгованого скло пластика.

В пояснювальній записці приводяться всі необхідні розрахунки, вона містить всі необхідні розділи і повністю відповідає встановленим вимогам.

У першому розділі (огляд літератури джерел) виконано огляд конструкцій пеленгаційних антен та наукові дослідження фрезерування тонкостінних деталей.

У технологічному розділі проекту розроблено технологію виготовлення деталі плата та спроектовано верстатний пристрій.

У дослідницькому розділі викладені результати наукових досліджень по оптимізації процесу фрезерування склопластику та на їх основі спроектовано різальний інструмент - фрезу.

Розроблено заходи з охорони праці.

Автор проекту: Володимир БЕРНАЦЬКИЙ



2022 р.

/Підпис/

Дата

РЕЦЕНЗІЯ

на дипломну магістерську роботу

Магістра Бернацького В.І.

на тему Розроблення технології виготовлення тонкостінних деталей
ТЕМ-рупора пеленгаційної антени

1. Актуальність і значення теми Актуальність магістерської роботи
визначається важливістю проектування та виготовлення систем пеленгації
БПЛА особливу у військовий час.

2. Оцінка якості та достовірності проведених досліджень
Достовірність отриманих експериментальних результатів
забезпечується високою схожістю отриманих теоретичних (аналітичних)
результатів з результатами практичного застосування на виробництві.

3. Оцінка запропонованих заходів та пропозицій .практичної цінності та
ефективності За результатами аналітичних та експериментальних досліджень
встановлені оптимальні режими різання та конструкції технологічного
оснащення і інструменту.

4. Загальний висновок та оцінка
Магістерська робота виконана відповідно до завдання, містить результати
теоретичних та експериментальних досліджень, які оформленні згідно вимог.
Викладені результати свідчать про високий рівень підготовки здобувача та
уміння вирішувати складні інженерні задачі.
Загалом робота заслуговує на оцінку «відмінно»

Рецензент к.т.н., доцент  А.В. Мартинюк

" 26 " грудня 2022 р.

Зміст

ВСТУП	7
1. ОГЛЯД ПЕЛЕНГАТОРНИХ СИСТЕМ ТА АНТЕН У ЇХ СКЛАДІ	8
1.1 Радіопеленгатори	8
1.2 Огляд антен як елементів пеленгаторних антенних решіток	11
1.3 Аналіз сучасних антенних систем	16
1.4 Технологія фрезерування тонкостінних деталей	20
2. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	25
2.1 Завдання для моделювання	25
2.2 Створення моделі ТЕМ-рупору в САD FEKO	26
3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	32
3.1 Вибір заготовки і обґрунтування методу її отримання	32
3.2 Вибір технологічних баз	33
3.3 Розробка варіанта технологічного маршруту обробки деталі	33
3.4 Розробка технологічних операцій	35
3.5 Створення керуючої програми для верста з ЧПК в САМ ESPRIT	36
3.6 Проектування верстатного пристрою	40
4 ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	44
4.1 Проведення операцій розкрою	44
4.2 Вибір та підбір інструменту для механообробки ПКМ	46
4.3 Підвищення продуктивності процесу різання	49
4.4 Вибір стратегії процесу під час свердління ПКМ	50
4.5 Експериментальні дослідження процесу фрезерування склопластика	56
5 ОХОРОНА ПРАЦІ НА ВИРОБНИЦТВІ	71
5.1 Аналіз технологічного процесу з точки зору охорони праці	71
5.2 Розрахунок захисного заземлення	75
ВИСНОВКИ	80

Перелік літературних посилань	81
Додатки	83

ВСТУП

Пеленгування та визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання (ДРВ) є важливим завданням при здійсненні заходів з радіоконтролю, що вирішується на користь цивільних та спеціальних служб, у тому числі при проведенні антитерористичних та військових операцій. При цьому об'єктом радіоконтролю може бути не окрема будівля, а цілий комплекс, що включає різні будівлі і лісопаркові зони. У таких умовах високу ефективність вирішення задачі локалізації ДРВ показують мобільні та переносні засоби радіоконтролю.

В даний час у зв'язку зі зниженням вартості та збільшенням корисного навантаження малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА), зменшенням масогабаритних показників апаратури радіоконтролю стало можливим використовувати малі БПЛА як носій радіопеленгаторів. Як і у разі наземного застосування, ефективність розв'язання задачі радіоконтролю залежить від таких характеристик радіопеленгаторів, як точність вимірювання кута приходу радіохвиль, вид поляризації пеленгованих сигналів, просторова роздільна здатність, чутливість та діапазон робочих частот. Зазначені характеристики радіопеленгатора значною мірою визначаються параметрами антенної системи, яка використовується. Тому дослідження та розробка радіопеленгаторів для малих БПЛА є дуже актуальним науково-практичним завданням.

При проектуванні радіопеленгаторів для малих БПЛА, що відповідає перерахованим вище вимогам, важливим завданням є розробка антенних систем і методів обробки сигналів, що приймаються, які враховують дифракційні спотворення вимірюваного електромагнітного поля, що є наслідком розсіювання падаючих хвиль на корпусі літального апарату, елементах його конструкції в умовах апріорно невідомої поляризації радіохвиль, що приймаються, і невизначеної кількості ДРВ.

1. ОГЛЯД ПЕЛЕНГАТОРНИХ СИСТЕМ ТА АНТЕН У ЇХ СКЛАДІ

1.1 Радіопеленгатори

Процедура визначення розташування джерела радіовипромінювання, як правило, є складним, багатоступінчастим процесом. Радіопеленгатори, розміщені в контрольованій ділянці простору, дозволяють, при використанні методу тріангуляції, виявляти джерело радіовипромінювання з точністю до декількох кілометрів (зазвичай ця величина становить $(1\div 3)$ % від відстані між радіопеленгаторами). Положення джерела радіовипромінювання може бути визначено і точніше — наприклад, за допомогою радіопеленгаторів мобільного (або бортового) базування, а також — за допомогою портативних радіопеленгаторів, що дозволяють виявляти та вимірювати параметри джерел, розташованих на відстані кілька сотень метрів. Аналіз технічної документації антенних систем за кілька останніх років показав, що компанія TCI внесла зміни до конструкції деяких антенних систем комплексів радіомоніторингу. Розглянемо ці зміни на прикладі антени TCI Model 643, призначеної для прийому сигналів як з вертикальною, так і горизонтальною поляризацією в діапазоні частот від 20 МГц до 3 ГГц.

Два варіанти конструкції антеної системи показано на рисунку 1.1. У першому варіанті антенна система TCI Model 643 складається з дев'яти пар ортогональних «плавникових» TEM-рупорів із загальною поздовжньою віссю симетрії. Для радіомоніторингу використовується біконічна вібраторна антена із круговою діаграмою спрямованості. У другому варіанті антенна система складається з дев'яти TEM-рупорів зі смужками, що розширюються, кожен з яких розділений на дві частини щілиною, що розширюється, подібно до антени Вівальді.

Аналізуючи характеристики варіантів конструкції антенної системи TCI Model 643 можна припустити, що перевагами нового варіанта антенної системи є покращена чутливість по пеленгуванню, простіша конструкція, а

також наступність з варіантом аналогічної конструкції антенної системи TCI Model 641 для прийому хвиль з вертикальною поляризацією.

Для діапазону частот 20 МГц – 8500 МГц компанія випускає антенну систему TCI Model 647D (рисунок 1.2), що відрізняється від TCI Model 643 наявністю додаткової підрешітки для діапазону частот 3000 МГц – 8500 МГц. Підрешітка складається з дев'яти TEM-рупорів зі смужками, що розширюються, і призначена для прийому сигналів з вертикальною поляризацією. Також дана антенна система включає додатковий перетворювач частоти, що здійснює перенесення радіочастот з діапазону 2,7 ГГц - 8 ГГц в діапазон частот 20 МГц - 3 ГГц, сумісний зі стандартними пеленгаторними радіоприймачами фірми TCI.

Особливістю антенних елементів, що застосовуються в антенних системах фірми TCI, є відсутність фазового центру, що створює певні труднощі при створенні математичного та програмного забезпечення, призначеного для отримання оцінки кутових координат ІРІ в режимі реального часу. Тим не менш, використання кореляційно-інтерферометричного способу пеленгування і бази даних частотно-кутових залежностей амплітуд і фаз коливань, що вдається досягти середньоквадратичної помилки пеленгування, що не перевищує 2° .

З іншого боку, використання в радіопеленгаторах, що серійно випускаються, спрямованих антен без фазового центру, дозволяє істотно підвищити їх чутливість і є серйозним новаторським кроком у техніці радіопеленгування. Тут же зазначимо, що можливість та ефективність використання спрямованих антен без фазового центру (TEM-рупорів та антен Вівальді) була показана в роботі [1], а в роботах [7 – 11] запропоновано шляхи подальшого розвитку даного напрямку антенної техніки.



Рисунок 1.1 — Конструкція антенної системи TCI Model 641



Рисунок 1.2 — Конструкція антенної системи TCI Model 643

Як випливає з проведеного вище аналізу, для універсальних радіопеленгаторних антенних систем інженери фірми TCI використовують надширокопasmові спрямовані антени, які не мають фазового центру: антени Вівальді та TEM-рупори.

1.2 Огляд антен як елементів пеленгаторних антенних решіток

Надширокосмугові (НШС) антени використовуються в різних областях радіоелектроніки. Багато досліджень присвячені випромінюванню НШС сигналів кільцевим АР на основі різних НШС випромінювачів [7].

Кільцеві антенні решітки (рис. 1.3) це система випромінювачів, розташованих по кільцю. Насправді застосовують АР у вигляді одного чи кількох кілець. Завдяки круговій симетрії такі решітки можуть використовуватися для отримання діаграм спрямованості (у площині решітки), що мало змінюються при скануванні в межах 360° . В якості АЕ кільцевих антенних решіток використовуються різні НШС антен [7].

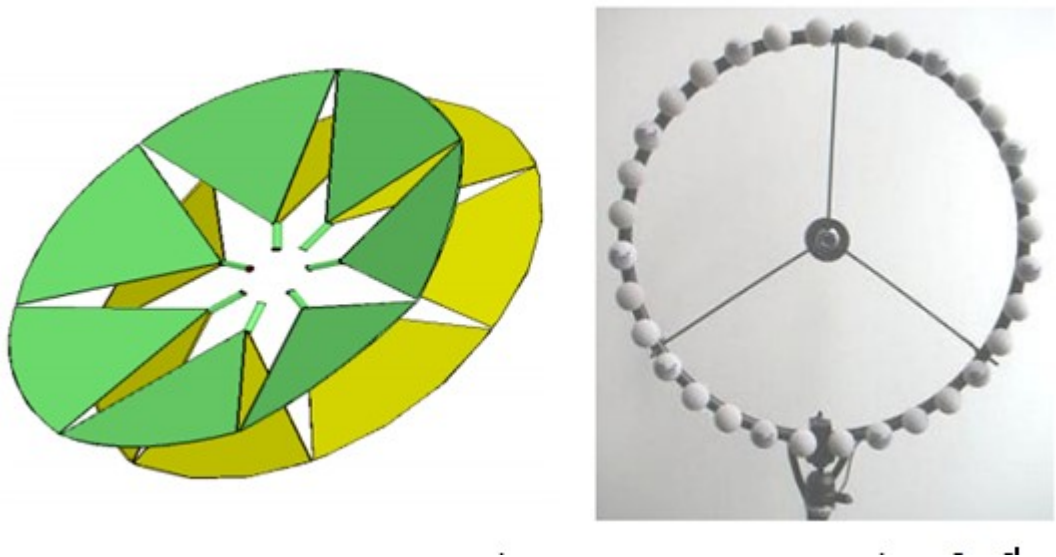


Рисунок 1.3 — Приклади кільцевих решіток антенних [7]

Однією з широко використовуваних в радіопеленгаторних комплексах конструкцією антени є друкована антена Вівальді, здатна функціонувати в надширокій смузі частот (рис. 1.4, а) [1]. Макет цієї антени представлений на рис. 1.4, б) [1]. В АР, що складається з АЕ типу Вівальді, взаємозв'язок між АЕ на малих відстанях (менших половини довжини хвилі на частоті робочого діапазону) є незначним, що покращує узгодження антени у складі антенної решітки. Ця властивість дозволяє будувати надширокосмугові кільцеві пеленгаторні антенні решітки з гарним узгодженням та задовільними спрямованими властивостями у надширокій смузі частот. [1].

Одиночна антена Вівальді має досить гарне узгодження вхідного опору та ефективно випромінює електромагнітні хвилі при розширенні щілини $\geq \lambda / 2$ [2]. Довжина щілини на нижній частоті при використанні підкладки, зробленої з оксиду алюмінію. Складає $\lambda 0,72$ [3]. Ширина діаграми спрямованості антени Вівальді складає 180° в Н-площині та 70° в Е- площині для апертури шириною $\lambda / 2$ [4].

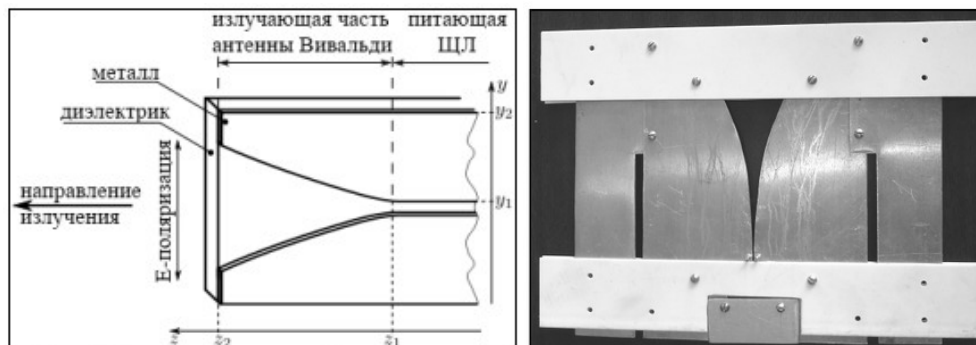


Рисунок 1.4 - Антена Вівальді: а) конструкція антени для частоти 1-2 ГГц [4]; б) одиночний елемент антенної решітки – модифікована антена Вівальді

При ширині апертури λ ширина головної пелюстки в Е- та Н- площині складає 60° та 70° відповідно. Для апертури розміром 1,5 і більше ширина діаграми спрямованості приблизно однакова в обох площинах; залежність ширини променя від ширини апертури представлені у таблиці 1.1 [1]:

Таблиця 1.1 – Залежність ширини променя від ширини апертури

Апертура (λ)	1,5	2	2,5	3,5
Ширина променя (град.)	50	42	38	31

Антени Вівальді мають досить високий рівень бічних пелюсток в Е- площині, що становить приблизно - 5 дБ. Поверхнева хвиля формується в неоднорідній щілинній лінії, в якій одночасно поширюється кілька типів електромагнітних хвиль, що може призводити до створення значної

складової поля з паразитною поляризацією, яка містить до 20-30% випромінюваної потужності [2]. Рівень крос поляризації можна знизити, зменшивши товщину діелектричної підкладки, проте це призведе до збільшення ширини головної пелюстки [2]. Часткове видалення діелектрика (наприклад, створенням у ньому отворів) призводить до зменшення бічних пелюсток без розширення променя [2].

Коефіцієнт спрямованої дії (КСД) антени Вівальді визначається за формулою [2]:

$$D \approx 10 L / \lambda_0, \quad (1.1)$$

де $e_p(t) = E_p \sin(\theta) \sin(\omega_0 t)$ – довжина антени; λ_0 – довжина хвилі в середині робочого діапазону. Товщина діелектричної підкладки t вибирається для заданої діелектричної проникності ε за формулою [2]:

$$t_{\text{eff}} / \lambda_0 \approx (\sqrt{\varepsilon} - 1) t / \lambda_0, \quad (1.2)$$

де $t_{\text{eff}} / \lambda_0$ – ефективна товщина діелектричної підкладки, нормована на λ_0 . Значення $t_{\text{eff}} / \lambda_0$ по можливості має бути в оптимальному діапазоні від 0,0025 до 0,0028. Нижнє значення ефективної товщини відповідає мінімуму бічних пелюсток, а верхнє – максимуму КСД [5]. Геометрія розкриття щілини антени Вівальді є важливою характеристикою, що впливає на опір антени. Форму розкриття можна описати такою формулою [6]:

$$y = C_1 e^{Rz} + C_2, \quad (1.3)$$

де коефіцієнти C_1 і C_2 вибираються таким чином, щоб експоненційний розкриття проходив через точки з координатами (y_1, z_1) і (y_2, z_2) , що знаходяться точно на початку і наприкінці розкриття відповідно, і розраховуються за формулами (рис. 1.5):

$$C_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}}, \quad (1.4)$$

$$C_2 = \frac{y_2 e^{Rz_2} - y_1 e^{Rz_1}}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}}, \quad (1.5)$$

де R_z — коефіцієнт розтину щілини.

Інша антена, яка часто використовується в радіопеленгаторних антенних ґратах, розроблена в 1950 [1] логоперіодична антена (рис. 1.8). Така антена здатна працювати в діапазоні частот, що характеризується коефіцієнтом частотного перекриття до 100 [1], і будується шляхом почергового масштабування кожного елемента, згідно з коефіцієнтом масштабування τ , який визначається за формулою [1]:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \tau. \quad (1.6)$$

На рисунку 1.5 довжина диполів позначена як L_n , кінці диполів лежать на прямих, що утворюють уявну вершину. Відстань від уявної вершини до диполя позначені величиною R_n , дистанція між елементами — d_n . Для побудови логоперіодичної антени необхідно також задати міжелементний коефіцієнт [2]:

$$\sigma = \frac{d_n}{2L_n}. \quad (1.7)$$

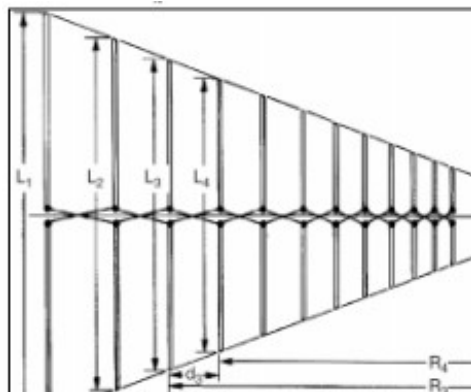


Рисунок 1.5 - логоперіодична вібраторна антена

Від наведених вище коефіцієнтів залежить коефіцієнт підсилення (КП) антени та ширина променя (приблизно дорівнює 70° в Е-площині та 110° у Н-площині). Також КП знаходиться у прямій залежності від числа елементів

логоперіодичної антени. Далі, за допомогою емпіричних формул, розраховується нижній K_1 та верхній K_2 коефіцієнти відсікання:

$$K_1 = 1,01 - 0,519\tau, \quad (1.8)$$

$$K_2 = 7,08\tau^3 - 21,3\tau^3 + 21,98\tau - 7,3 + \sigma(21,82) - 66\tau + 62,2\tau^2 - 18,29\tau^3 \quad . \quad (1.9)$$

Довжину найбільшого та найменшого диполя визначаємо за формулами $L_1 = K_1\lambda_L$ та $L_U = K_2\lambda_U$, λ_L та λ_U , довжина хвилі на нижчій та вищій робочій частоті відповідно. Знаючи коефіцієнти K_1 , K_2 і частотний діапазон, в якому працює проєктована антена, визначимо кількість елементів антени:

$$N = 1 + \frac{\log(K_2/K_1) + \log(f_L/f_U)}{\log\tau}. \quad (1.10)$$

Осьова довжина антени обчислюється за формулою:

$$D = R_1 - R_n = R_1(1 - \tau^{N-1}) = \frac{2L_1\sigma(1 - \tau^{N-1})}{1 - \tau}. \quad (1.11)$$

Перша міжелементна відстань визначається як $d_1 = 2\sigma L_1$. Відстань від вершини до поточного елемента обчислюється за такою формулою. Знаючи параметри L_1 , R_1 і d_1 ітераційно отримуємо значення цих параметрів для інших диполів:

$$L_n = \tau^{n-1}L_1, R_n = \tau^{n-1}R_1, d_n = \tau^{n-1}d_1. \quad (1.12)$$

При побудові решітки з логоперіодичними антенами можуть з'являтися вузькосмугові провали КП. Частотний інтервал між провалами відповідає коефіцієнту масштабування антени τ , але саму частоту провалу передбачити складно. Причиною такого падіння КП є наведені на фідері несиметричні струми, які, взаємодіючи з елементами антени, генерують крос поляризоване

випадково-спрямоване випромінювання. Ці небажані струми наводяться на фідер в результаті асиметрії антен або взаємодією між антенами в ґрати [1].

1.3 Аналіз сучасних антенних систем

Аналіз сучасних антенних систем компаній-виробників Rohde&Schwarz (Німеччина), TCI (США), Alaris Antennas (ПАР), CRFS (Великобританія), [1–5] та інших, що спеціалізуються в галузі розробки та серійного виробництва засобів радіоконтролю, проведений з метою виявлення тенденцій та напрямів розвитку техніки спеціального призначення. Загальні технічні характеристики антенних систем вищезгаданих виробників представлені у таблиці 1.

З зрозумілих причин виробники неохоче надають інформацію щодо конструктивних особливостей своїх антенних виробів. Розглянемо особливості конструктивних рішень деяких антенних систем, розкритих у [6], що обробляють сигнали з вертикальною і горизонтальною поляризацією.

Антенна R&S ADD197 [7] (рисунок 1) призначена для використання в мобільному та стаціонарному варіанті. Має багатоелементну структуру зі змінною електричною довжиною. Вбудований перемикач дозволяє вибрати поляризацію сигналів (дозволяє оцінити пеленг джерела радіовипромінювання при використанні її у складі одноканального кореляційно-інтерферометричного пеленгатора в діапазоні частот 20 (40) – 1300 МГц).

Для прийому сигналів у вертикальній площині в антенній системі використано дев'ять диполів, розташованих з рівним кутовим кроком. Антенні елементи виконані у друкованому виконанні. Максимальна висота елементів складає 0,2 м-коду.

Для прийому сигналів з горизонтальною поляризацією в антенній системі використано дев'ять рамкових антен діаметром 0,19 м, розташованих з рівним кутовим кроком. Антенні елементи також виконані у друкованому виконанні.

Перемикання між антенними ґратами вертикальної та горизонтальної поляризації реалізовано за допомогою р-і-п-діодного перемикача.



Рисунок 1.6 – Вид антени R&S ADD197

Чутливість пеленгування сигналів з вертикальною поляризацією в діапазоні частот від 20 до 1300 МГц становить від 13 до 24 мкВ/м; середньоквадратична помилка пеленгування не перевищує 2 градуси у смузі частот від 20 до 80 МГц та 1 градус – у смузі частот від 80 до 1300 МГц. Технічною особливістю даного комплексу є наявність одноканального приймального пристрою та перемикача зі складною комутаційною схемою, а також набір фазообертачів. Принцип роботи полягає в наступному: сигнали від кожного елемента антени, крім основного каналу, проходять через фази, які зміщують фазу сигналу на 90, 180 і 270 градусів і складаються з основним каналом. Приймач вимірює амплітуду сумарного сигналу після кожного додавання. Це дозволяє відновити фазову картину розподілу фронту сигналу, що приходить, маючи в розпорядженні лише один канал аналого-цифрової обробки. З одного боку, таке рішення знижує загальну вартість виробу, але збільшує час пеленгації.

Для продуктів компанії TSI [8] характерне широке використання надширококутових спрямованих антенних елементів, які не мають фазового центру. До цього часу базовою конструкцією антенної системи радіопеленгатора була конструкція антенної решітки у вигляді дев'яти пар ортогональних «плавникових» ТЕМ рупорів із загальною поздовжньою віссю

симетрії, центральний біконічний вібратор використовувався як опорний елемент.

Новий варіант антеної системи TCI 643 [9] являє собою дев'ять TEM рупорів з полосковими елементами, що розширюються (рисунок 2 а). Кожна із смужок розділена на дві частини щілиною, що розширюється, подібно до антени Вівальді.

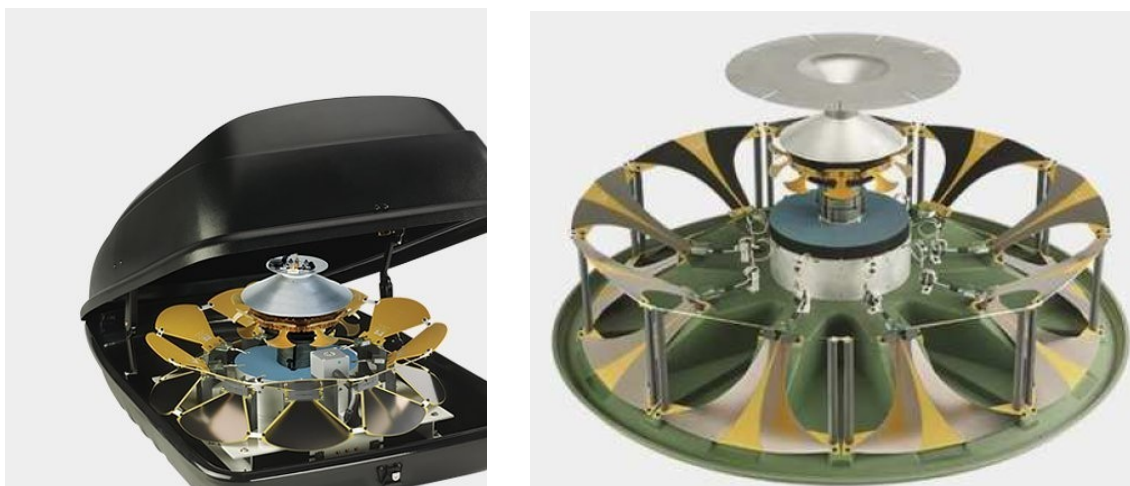


Рисунок 1.7 – Вид антени *а)* TCI 645-8, *б)* TCI 641H

Згідно з інформацією на сайті компанії TCI, чутливість нового варіанту антени в цілому вища, ніж у попереднього варіанту, де можливий одночасний прийом хвиль з вертикальною та горизонтальною поляризацією. У новому варіанті необхідно попередньо вибрати спосіб підключення чотирьох половинок смужок до комутатора — обидві половинки кожної смужки заживлюються синфазно (вертикальна поляризація) або протифазно (горизонтальна поляризація).

Передбачається, що перевагою нової антени для прийому хвиль з горизонтальною та вертикальною поляризацією є більш проста конструкція в порівнянні з аналогічною антеною TCI 641, призначеною для прийому хвиль з вертикальною поляризацією (рисунок 2 б).

Антенна решітка у вигляді TEM рупорів змушує розробляти програмне забезпечення корекції пеленгу в реальному масштабі часу на складнішому рівні фізико-математичного опису процесів, що протікають у просторово-

розподілених електродинамічних об'єктах. Тим не менш, завдяки використанню процедури інтерференційно-кореляційного пеленгування і бази даних, що складається з частотно-кутових залежностей амплітуд і фаз коливань, в радіопеленгаторах, оснащених антеною системою TCI 643, вдається досягти середньоквадратичної похибки пеленгування, не [6].

Аналіз технічних характеристик існуючих пеленгаторних антен показав, що на сьогоднішній день лише небагато світових розробників і виробників апаратури випускають антенні системи для радіопеленгації сигналів як з вертикальною, так і з горизонтальною поляризацією. Це фірми Rohde&Schwarz (Німеччина) та TCI (США). Технічні рішення, які застосовуються при виготовленні таких антенних пристроїв фірмами-розробниками, знижують загальну вартість виробу, але збільшують час пеленгації.

У розвитку сучасних систем радіомоніторингу проявляється стійка тенденція розширення частотного діапазону. В даний час це досягається шляхом зміни блоків антеної системи. З цим пов'язані значні труднощі їх використання. При цьому для виявлення об'єктів з низьким енергетичним потенціалом та з метою збільшення дальності виявлення необхідно використання антенних систем з високим коефіцієнтом посилення. Тому намагаються створювати широкосмугові антенні системи з високим коефіцієнтом посилення.

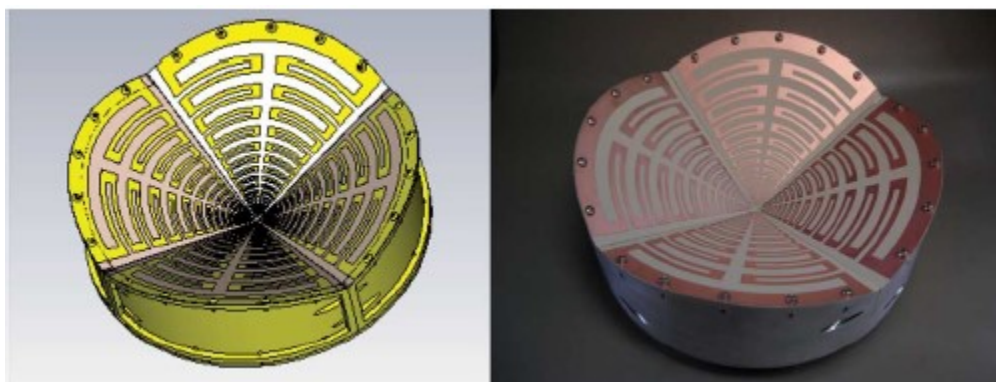


Рисунок 1.8 — Антена «ELEVEN»

1.4 Технологія фрезерування тонкостінних деталей

Проблема фрезерування нежорстких деталей полягає у виникненні технологічної деформації заготовки, викликаній впливом інструменту на заготовку [4]. На рисунку 1 зображено схему обробки, що ілюструє цю проблему. У разі жорсткої заготовки її відхилення від вихідного стану не робить значного вкладу в точність одержуваної поверхні. Для податливої заготовки ситуація протилежна: суттєве відхилення заготовки спричиняє нерівномірне зрізання матеріалу, що призводить до похибки форми [5–7]. Таким чином, якщо конструктивні вимоги податливого виробу задають вузький допуск на похибку форми поверхні, що обробляється фрезеруванням, необхідно враховувати технологію жорсткості заготовки або застосовувати альтернативні способи формоутворення, наприклад адитивні технології [8].

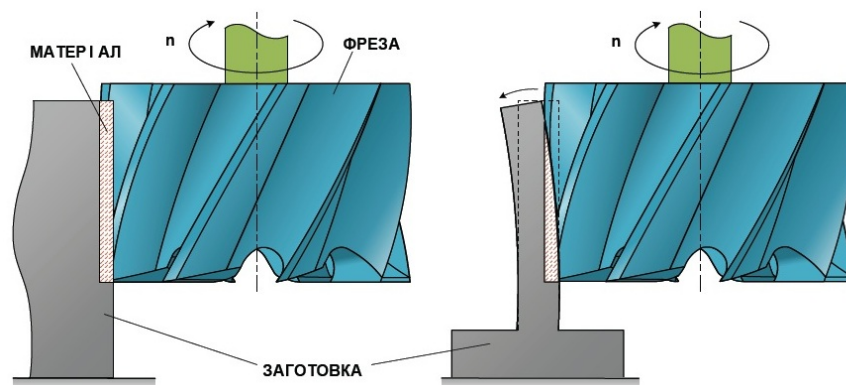


Рисунок 1.9 - Фрезерування тонкостінних елементів

У даний час розробка технологічного процесу фрезерної обробки тонкостінних деталей вимагає індивідуального підходу в кожному конкретному випадку та залежить від геометричної конфігурації виробу, матеріалу заготовки, технологічних можливостей виробництва, а також вимог до точності, якості поверхні та економічних обмежень.

Один із підходів до вирішення проблеми технологічного деформування полягає у виборі відповідної стратегії видалення матеріалу [9]. Наприклад, згідно з емпіричним правилом «8 до 1» для виготовлення тонкостінних ребер

рекомендується зрізати матеріал послідовно, чергуючи сторони заготовки, що обробляється, при кожному проході осьова глибина різання не повинна перевищувати кінцеву товщину стінки більш ніж у вісім разів [10]. Застосування цього правила забезпечує підтримку більш тонкої частини заготовки більш товстою.

Призначення інструменту також відіграє важливу роль у розробці технологічного процесу фрезерування податливих виробів [11]. Раціональний вибір головного кута в плані дозволяє задавати напрямок сили різання, завдяки чому можна досягти застосування основної складової сили різання вздовж найбільш жорсткого напрямку заготовки. Крім того, при розробці технологічних процесів технологи приділяють велику увагу числу зубів фрези, оскільки від цього параметра залежать інші характеристики процесу, у тому числі сила різання. Як правило, перевагу віддають інструменту з великою кількістю зубів, керуючись навіть жорсткістю самої фрези. Застосовуються також способи, що пропонують використовувати спеціальне технологічне оснащення та пристосування. Додаткова рухома опора перешкоджає відхиленню заготовки, а демпфуючий елемент, вбудований у підтримуючу голівку, скорочує роль вібрації, що веде до покращення якості поверхні.

Ще один спосіб зменшення деформації при обробці полягає в тому, щоб тимчасово підвищити жорсткість заготовки за допомогою технологічного заповнювача. Таким заповнювачем може бути легкоплавкий метал або термопластичний склад. У випадках, коли це дозволяє геометрична конфігурація виробу, матеріалом в рідкому або пластичному стані заповнюють порожнину заготовки і створюють умови для затвердіння, після чого проводять обробку. Фрезерування заповненої жорсткої заготовки супроводжується відносно невеликими деформаціями і не викликає похибок форми. Після завершення обробки заповнювач розм'якшують і вилучають із деталі.

Розглянуті способи фрезерування тонкостінних заготовок до теперішнього часу знаходять застосування в різних ситуаціях і використовуються на виробництві. Однак кожен з них має свої обмеження та сферу застосування. Нещодавно було запропоновано новий перспективний підхід до обробки тонкостінних деталей, названий методом м'яких режимів різання [13]. Цей метод полягає в тому, щоб з використанням цифрового моделювання процесу різання вибрати раціональні режими та умови обробки, які, з одного боку, дозволять досягти необхідної продуктивності, а з іншого – створять сприятливі умови фрезерування та дозволять контролювати сили різання таким чином, щоб деформація заготовлі не перевищувала встановлених меж.

Для промислового застосування методу м'яких режимів різання потрібна розробка програмного забезпечення, яке надасть технологу інтерфейс для управління технологічними параметрами та обмеженнями, моделювання процесу та аналізу результатів. Опис розробки такої системи наведено у статті [14]. В основі її роботи лежить чисельне МКЕ-моделювання у прикладному програмному комплексі Abaqus.

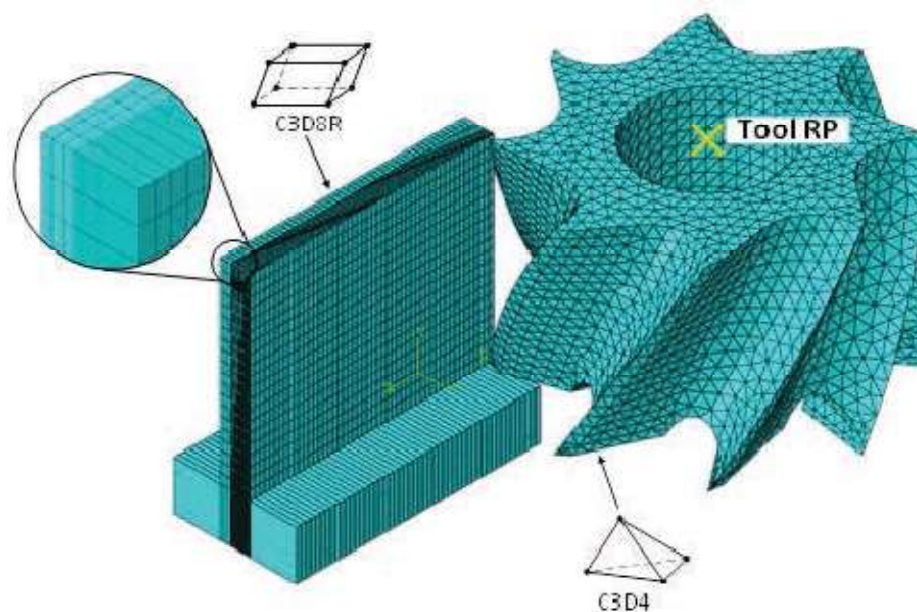


Рисунок 1.10 - МКЕ сітка моделі

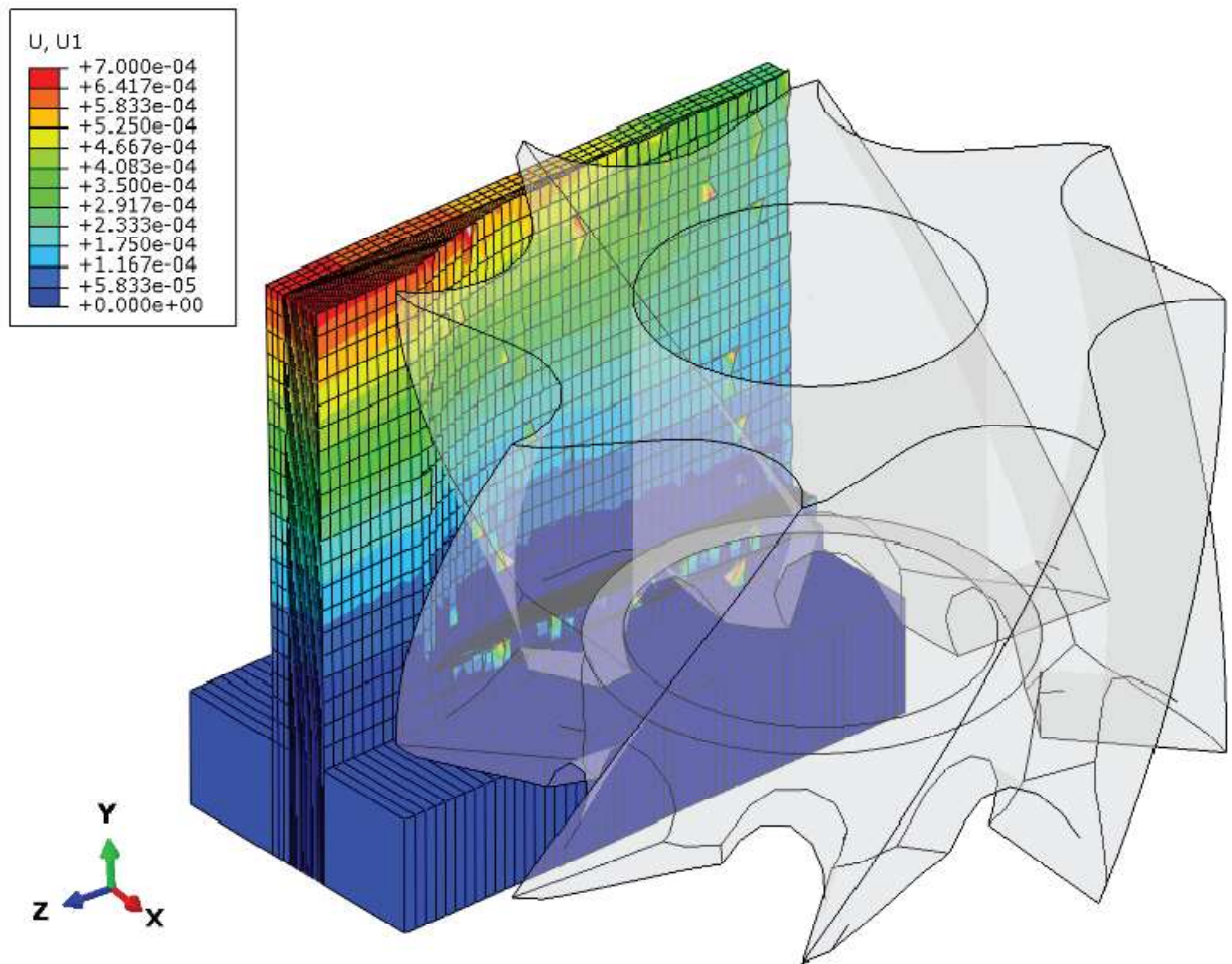


Рисунок 1.11 — Поле вузлових переміщень заготовки (проекція на OX): вузлові переміщення

Для випадку попутного фрезерування тонкого ребра розроблено модель у системі Abaqus, в якій враховується податливість заготовки. При розробці прийнято деякі припущення, такі як припущення про абсолютно жорсткий інструмент або нехтування тепловими ефектами. У подальшій роботі з цього напрямку слід врахувати зазначені спрощення.

Моделювання враховує явища руйнування матеріалу заготовки з використанням емпіричної апроксимації Джонсона-Кука. Загалом результати добре узгоджуються з інтуїтивними уявленнями про механіку процесу, але потребують експериментального підтвердження. Актуальність подальших досліджень на цю тему підтверджується діаграмою результуючої товщини стінки, згідно з якою її товщина може досягати 3,4 мм замість очікуваної 2,5 мм.

За допомогою розробленої моделі можна будувати прогнози щодо точності фрезерування. Крім того, система Abaqus дозволяє отримати важливі характеристики процесу, включаючи силу різання. Ці дані можуть бути застосовані для реалізації автоматизованого підбору раціональних режимів різання, в основі якого лежать сучасні аналітичні методики, що спираються на певну силу різання.

2. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Задачі на моделювання

У магістерській роботі разом із спеціалістами ДП “Новатор” було виконано моделювання характеристик антени типу TEM–рупор в діапазоні робочих частот від 1000 до 6000 МГц у складі кільцевої антенної решітки.

Як уже зазначалося, геометричними параметрами рупора є його довжина та два кута: α – кутовий розмір пластин і β – кут між пластинами (рис. 2.1) [17].

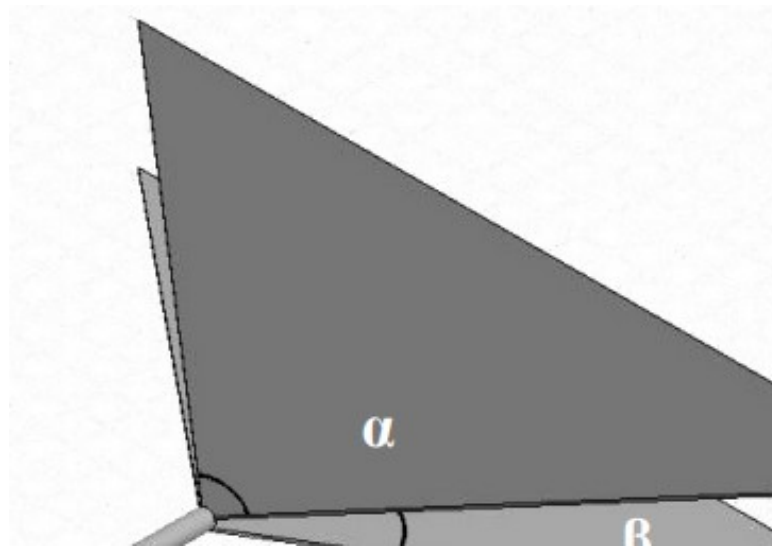


Рисунок 2.1 – Геометрія TEM–рупору

2.2 Створення моделі TEM–рупора в CAD FEKO

У цьому розділі буде створено модель TEM–рупора для подальшого моделювання його характеристик у програмному пакеті FEKO. На рис. 2.2 наведено ескіз TEM–рупор у декартовій системі координат для створення моделі в CAD FEKO. Таким чином, згідно з цією моделлю є можливість змінювати основні три параметри рупора: його довжину L , кутове розширення пластини β і кут між пластинами α .

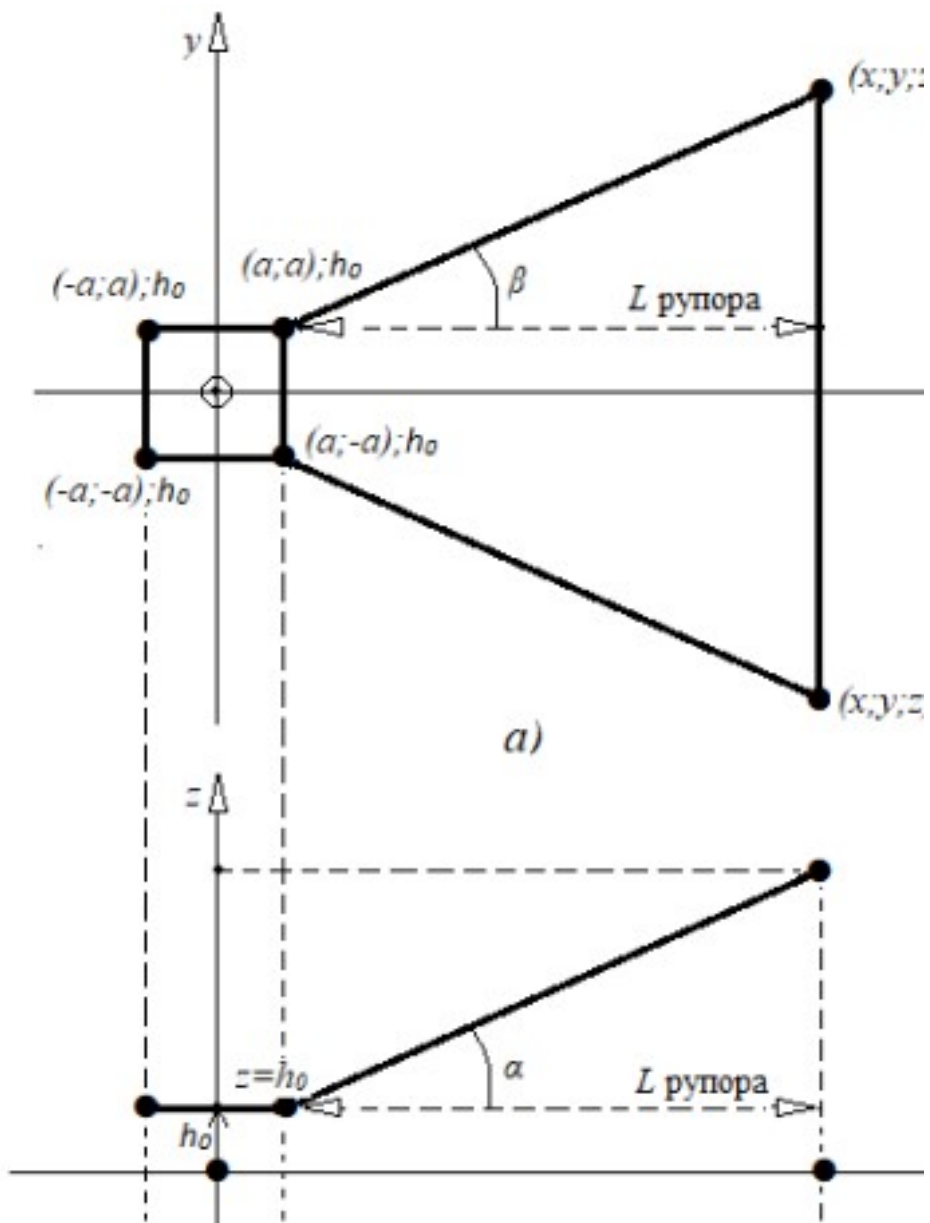


Рисунок 2.2 – Вид TEM–рупора в декартовій системі координат:

а) вид зверху (вісі xy); б) вид збоку (вісі xz)

2.3 Антенна система із щілинних елементів хвилі, що біжить з метаматеріальними друкованими лінзами для повного азимутального пеленгування джерел радіовипромінювань з довільною поляризацією

Можливість прийому та пеленгування сигналів з довільною поляризацією є суттєвим технічним параметром пеленгаторної антенної системи, призначеної для розміщення на мобільному носії особливо на

БПЛА. Однак проведений у роботі [14] аналіз сучасних радіопеленгаторних антенних систем, що випускаються такими великими виробниками, як Rohde&Schwarz, TCI, Alaris Antennas, CRFS, Іркос, показав, що лише деякі з них виробляють радіопеленгаторні антенні системи для прийому сигналів із довільною поляризацією. Тому розробка антенних систем такого типу з урахуванням розвитку напряму застосування БПЛА для радіоконтролю, є актуальним завданням.

В даному розділі розроблено та досліджено антенну систему для повного азимутального пеленгування джерел радіовипромінювань з довільною поляризацією в діапазоні частот від 1 ГГц до 3 ГГц, що складається із щілинних елементів хвилі з метаматеріальними друкованими лінзами [56].

В якості одиничного антенного елемента системи, що розробляється, пропонується використовувати пару ортогональних елементів типу Вівальді [57] з матеріальними поляризаційно–виборчими лінзами у їхніх розкриттях (рис. 2.3).

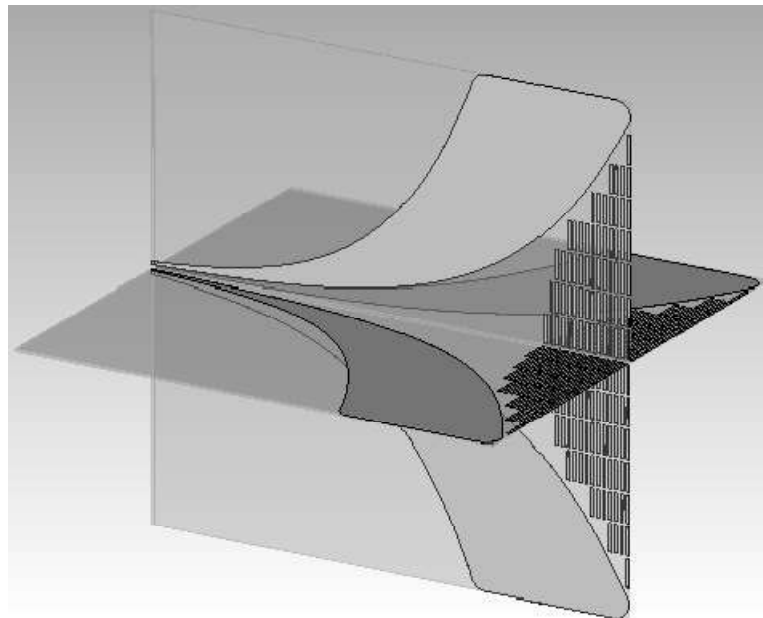


Рисунок 2.3 – Базовий антенний елемент системи

Елементи антени виконані за технологією виробництва друкованих плат на діелектричному СВЧ матеріалі RO4003 [58] з двосторонньою металізацією фірми Rogers. Товщина діелектрика складає 0,508 мм, габаритні розміри пари елементів – 160 мм'160 мм'160 мм.

Антени типу Вівальді широко застосовуються у сучасних системах радіоконтролю в сантиметровому [59–61] і міліметровому [62, 63] діапазоні довжин хвиль через простоту та надійність їх конструкції, великого перекриття по діапазону робочих частот, спрямованих властивостей у короткохвильовій (щодо розмірів антени) робочої області та можливості їх використання як датчиків поля та довгохвильової робочої області. Антенні елементи такого типу застосовувалися в одному з варіантів конструкції пеленгаторної антенної системи Model 643 фірми TCI [14].

Відносною особливістю запропонованого варіанта реалізації антени Вівальді є застосування друкованої лінзи в її розкриві, яка збільшує кросполяризаційну розв'язку і покращує діаграму спрямованості та вхідні характеристики антенних елементів.

На основі цього принципу була запропонована конструкція [92] антенного елемента, яка показана на рис. 2.4.

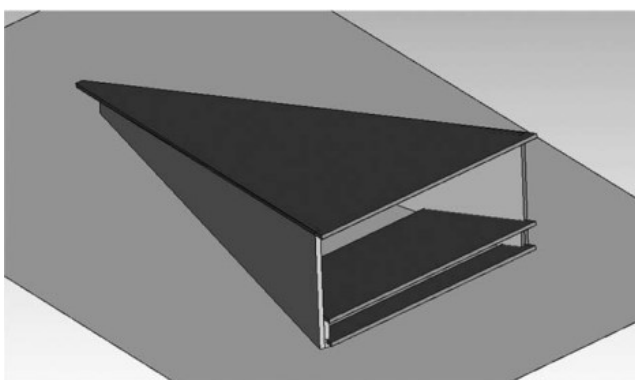


Рисунок 2.4 – Антена на основі вкладених TEM–рупорів

а) електродинамічна модель; б) фізична реалізація

Антенний елемент складається з основного несиметричного TEM–рупора та двох вкладених в нього квазіфрактальних структур із TEM–

рупорів з різними ступенями подібності (3 елемента з коефіцієнтом подібності 0,25 и 9 елементів з коефіцієнтом подібності 0,0625). Кожен рівень вкладення призначений для відповідної антенної літери.

Оскільки розподіл збудливого поля в розкритті рупора симетричний відносно будь-якої площини, що проходить через вісь симетрії рупора, то вказані хвилі однакові по амплітуді і протифазні, тобто вони взаємно гасяться. Хвилі, відбиті від кромки, в такому рупорі практично відсутні, рівень бічного випромінювання в площині Е помітно знизиться; коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) рупора в 10-процентному по відношенню до величини частоти діапазоні менше 1,015. Рупор складається з відрізка живлячого однохвильового хвилеводу, відрізка двоххвильового хвилеводу (секція збудження), кінцевого переходу між ними і кінцевої частини рупора.

Такий двохмодовий рупор працює таким чином: у секції збудження і фазування поле хвилі H_{11} , що живить рупор, збуджує хвилю E_{11} з відповідною амплітудою і фазою. Довжина секції збудження підбирається так, щоб в розкритті рупора сумарне поле з урахуванням відмінності фазових швидкостей поширення хвиль H_{11} і E_{11} в кінчній рупорній частині виявилось синфазним. Для цього практично вимагається забезпечити можливість регулювання довжини відрізка секції збудження і фазування. Описаний рупор створює симетричну ДС у відносно вузькому частотному діапазоні (близько 5...15%).

Отримати практично таку ж широкопasmову антену, як і рупорно-параболічну, дозволяє використання в якості опромінювачів розфазованих рупорів. На рисунку 2.5 зображена конструктивна схема розфазованого рупора з кутом розкриття 2α , який має плавний параболічний перехід 1 від хвилевідної частини до кінцевої 2.

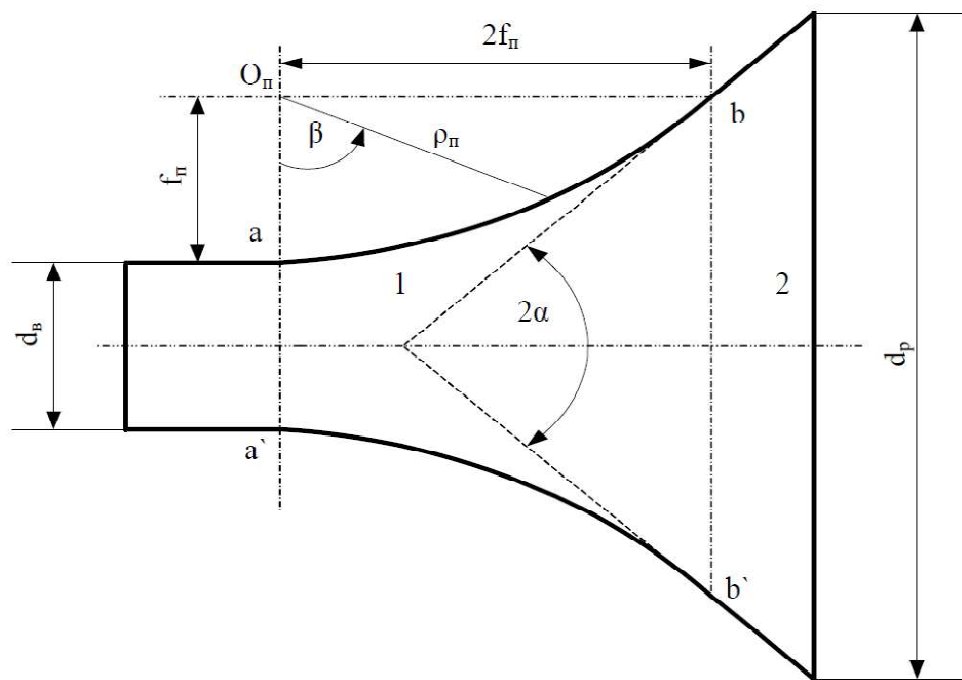


Рисунок 3.5 - Конструктивна схема розфазованого рупора

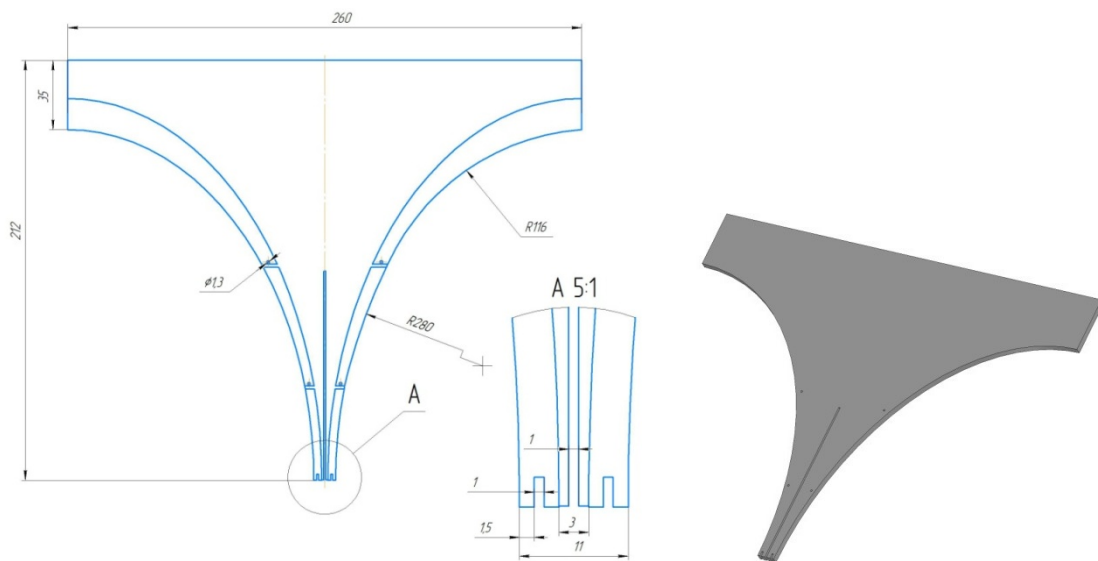


Рисунок 3.5 - Деталь тонкостінна плата TEM-рупора

3 Технологічний розділ

3.1 Вибір заготовки і обґрунтування методу її отримання.

Вибір способів отримання заготовок - завжди є складною, трудомісткою задачею, оскільки часто різні способи однаково вбезпечити економічні та технічні вимоги, що виставляються до конструкції деталі. Обраний спосіб має бути економічно обґрунтованим та не надзвичайно трудомістким процесом, а також забезпечувати високу якість усіх параметрів деталі.

На вибір способів отримання заготовки мають вплив: характер виробництва, матеріал та вимоги, які пред'являються до деталі, габаритні розміри, маса та конструктивні елементи деталі, якість поверхонь та інше.

Заготівлю для деталі «плата», для порівняння, можна отримати двома методами: лазерне вирізання та фрезеруванням контуру. Лазерне вирізання потребує більшої дороговартісної обладнання а також проблеми при налаштуванні вирізання багатошарового матеріалу, фрезеруванням з ЧПК можна

Для визначення кращого із варіантів отримання заготовки виробляємо техніко-економічне обґрунтування [11].

Розрахунок вартості заготовок – один із основних етапів машинобудівного виробництва, який в подальшому безпосередньо впливає на витрати матеріалу, якість отриманого виробу, сумарну трудомісткість його виготовлення.

Вибір виду заготовки відіграє велику роль у технологічному процесі механічної обробки деталі. Чим ближче за формою і розмірами вихідна заготовка до готової деталі, тим менше часу необхідно для її оброблення, меншою є витрати матеріалів, і отже, нижчими буде собівартість виробу.

Оскільки деталь відносно простою за конфігурацією (хоча і є складні поверхні), із врахуванням виду виробництва (одиничний або дрібносерійний) і матеріалу заготовки (фольгований склопластик ДСТУ 3135.32-2001)

Для вибору найбільш доцільного методу отримання заготовки орієнтувались на наявне обладнання ДП Новатор та його завантаження. За результатами аналізу обрано отримання заготовки фрезеруванням

3.2 Вибір технологічних баз

При виборі технологічних баз для обробки деталі “плата” користувалися рекомендаціями із базування деталей класу “пластини”, приведені в [12], так як деталь зовні в основному утворюється плоскими поверхнями. Схеми базування відповідають схемам базування плоских деталей (на три площини).

На першій операції обробляються, поверхні, які будуть служити базами для наступних операцій. За чорнові бази для першої операції приймаємо найбільшу за розмірами зовнішню плоску поверхню заготовки та торець.

Схема базування заготовки на першій операції показана на рис. 2.3.



Рисунок 3.1 - Схема базування деталі на першій операції.

3.3 Розробка варіанта технологічного маршруту обробки деталі

При виборі методу обробки поверхонь відштовхувались з його технологічних можливостей:

- можливості ТП по забезпеченню точності та якості поверхні;
- величиною технологічного припуску, що знімається;
- часу оброблення відповідно до заданої продуктивності.

Вибираємо методи оброблення поверхонь на основі рекомендацій таблиць економічної точності оброблення [15] і результати заносимо в табл.

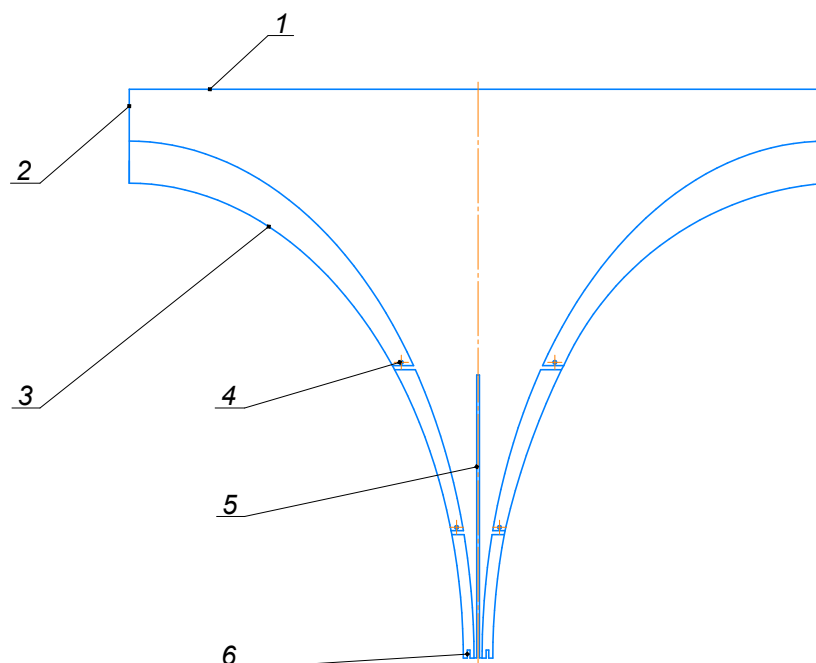


Рисунок 3.2 - Нумерація поверхонь

Таблиця 3.1 - Методи обробки поверхонь деталі

№ пов.	Назва поверхні, розмір	Точність обробки (квалітет)	Маршрут обробки поверхні
1	2	3	5
1,2	Торцеві поверхні	H14	1. Фрезерування чорнове 2. Фрезерування чистове
3, 8	Криволінійні поверхні	H14	1.Фрезерування чорнове 3. Фрезерування чистове
4	Отвори $\varnothing 2$	h14	1.Свердлування
5, 6	Пази	H14	1. Фрезерування чорнове 2. Фрезерування чистове

На основі розглянутих типових маршрутів обробки окремих поверхонь розроблено маршрут обробки деталі вцілому. При розробленні маршруту урахуємо рекомендовану послідовність обробки [5]: спочатку обробляють поверхні, прийняті за встановлювані бази, а потім решту в послідовності, зворотній ступеню їх точності, тобто чим точніша оброблювана поверхня, тим пізніше вона обробляється. На кінцевій стадії обробляємо найбільш

точну поверхню, яка має, в свою чергу, найбільше значення для деталі. Крім того, у кінець маршруту виносять обробку легко пошкоджуваних поверхонь – для нашої деталі такими являються різьби.

За критерій оптимальності варіанту технологічного маршруту приймають мінімум приведених витрат, що приходяться на одиницю продукції [15].

3.4 Розробка технологічних операцій

При проектуванні технологічних операцій необхідно рішити такі питання: вибрати технологічне оснащення, розрахувати режими різання; визначити розміри, на які буде наструюватись інструмент; норми часу, розробити операційні ескізи і схеми наладок.

При уточненні змісту операції остаточно встановлюється, які поверхні деталі будуть оброблятися на даному етапі. При розробці послідовності та змісту переходів необхідно прагнути до скорочення часу обробки за рахунок раціонального вибору засобів технологічного оснащення, числа переходів, суміщення основного і допоміжного часу. Суміщення переходів визначається конструкцією деталі, можливостями розташування різальних інструментів на верстаті і жорсткістю заготовки.

Під час вибору верстатів враховують такі фактори:

- вид чи види обробки, які мають виконуватись на операції, для якої вибирається верстат;
- габарити, маса і конфігурація деталі;
- точність забезпечуваних на операції розмірів;
- бажана продуктивність обробки;
- можливість роботи на оптимальних режимах різання з необхідною подачею, швидкістю різання і потужністю.

Для обробки деталі «плата» вибираємо наступні моделі верстатів:

- для фрезерної обробки – вертикально-фрезерний верстат з ЧПК мод. HAAS VF-3.

- для обробки отворів , фрезерування пазів, фрезерування фасонної поверхні – вертикально-фрезерний обробний центр HAAS VF-3;

Тип верстатних пристроїв залежить від виду заготовки, її габаритних розмірами, точності обробки. У проектованому технологічному процесі на більшості операцій будуть використовуватись спеціальні і універсальні пристрої.

Вибір різального інструменту для певної технологічної операції означає визначення для кожного з переходів типу і типорозміру інструмента, а також матеріалу і геометричних параметрів його різальної частини.

Дані по технологічному оснащенню приведені у картах технологічного процесу.

3.5 Створення керуючої програми для верста з ЧПК в CAM ESPRIT

Для виготовлення деталі плата у технологічнокм процесі запропоновано використовувати високопродуктивний вертикально-фрезерувальний верстат Haas VF-3.

Для створення програми були виконані наступні дії:

1. У програмному продукті SolidWorks було створену 3D модель пластини та завантажено у середовище CAM Esprit.

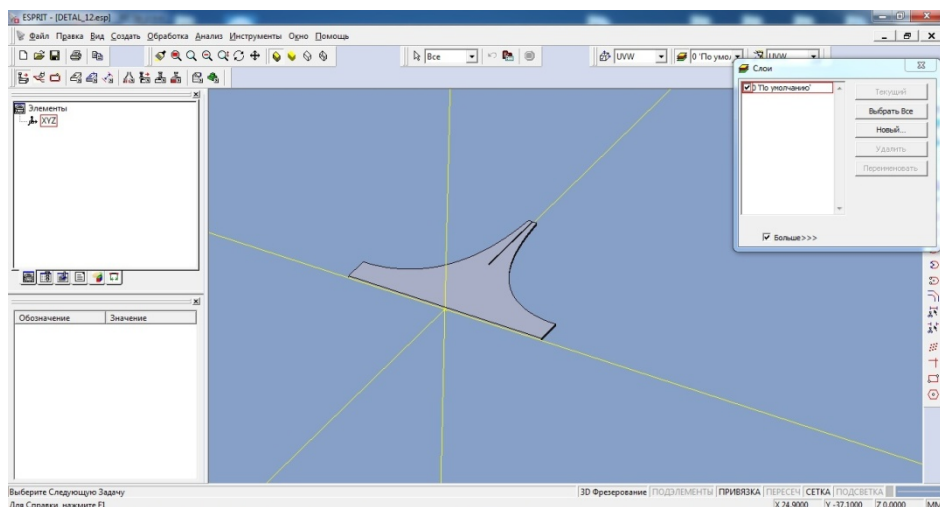


Рисунок 3.3 – 3D модель пластини у середовище CAM Esprit

2. Створено заготовку

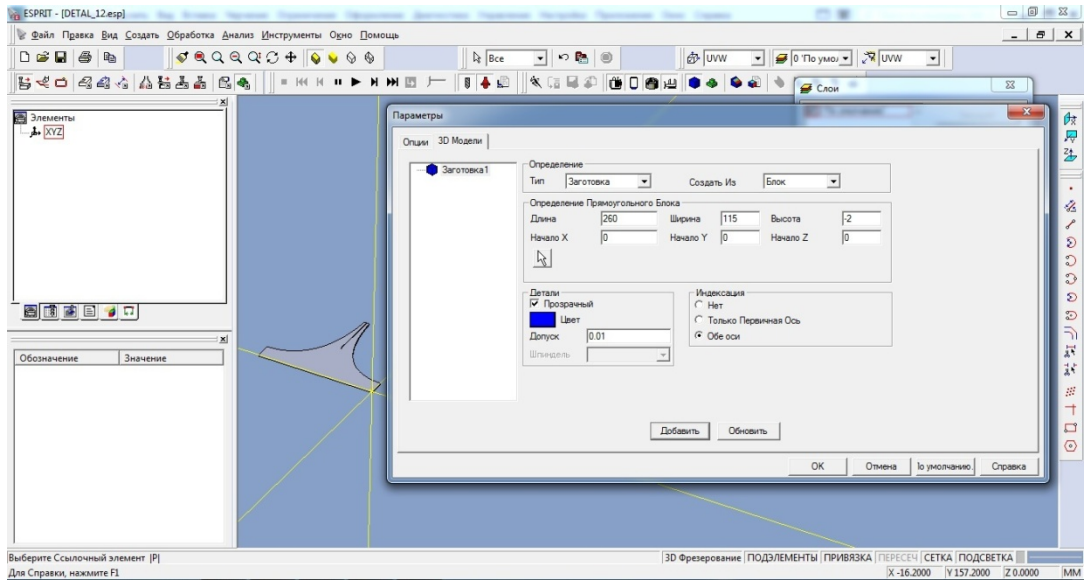


Рисунок 3.4 – Створення заготовки

3. Виконано розпізнання елементів шатуна рис. 2.6.

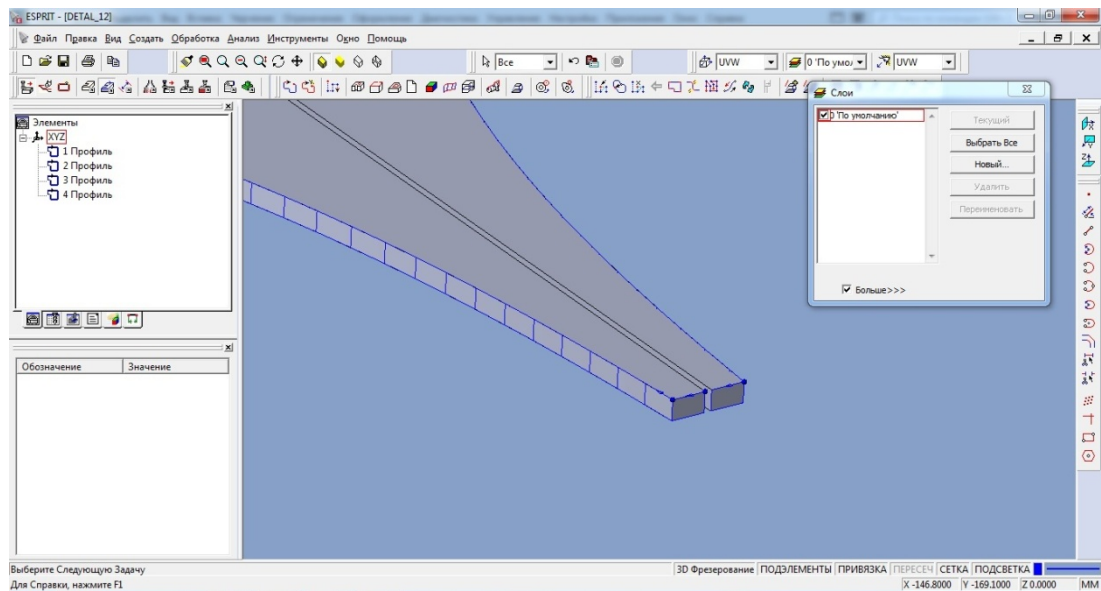


Рисунок 3.5 – розпізнання елементів пластини

4. Вибрано вид оброблення

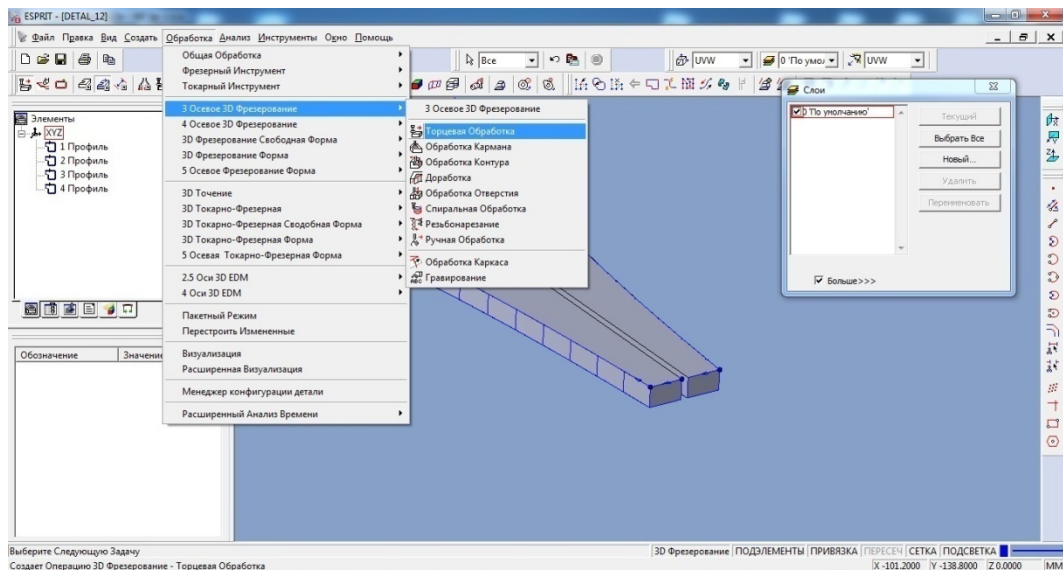


Рисунок 3.6 – розпізнання елементів пластини

5. Вибрано металообробний інструмент та його параметри (рис. 2.7).

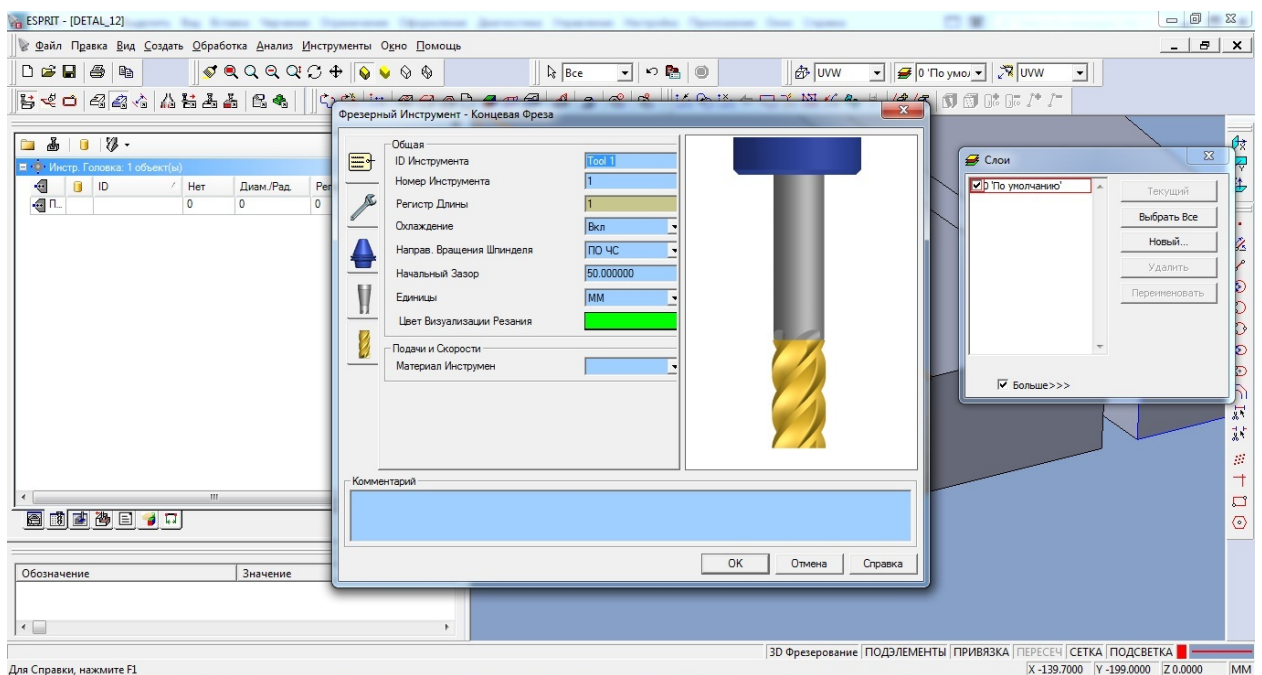


Рисунок 3.7 – Вибір інструменту

6. Вибрано стратегію оброблення.
7. Вибрано режими різання.
8. Автоматично згенеровано траєкторію руху металорізальних інструментів при обробленні елементів корпусу.

9. Виконано візуалізацію процесу оброблення з метою виявлення помилок при обробленні;

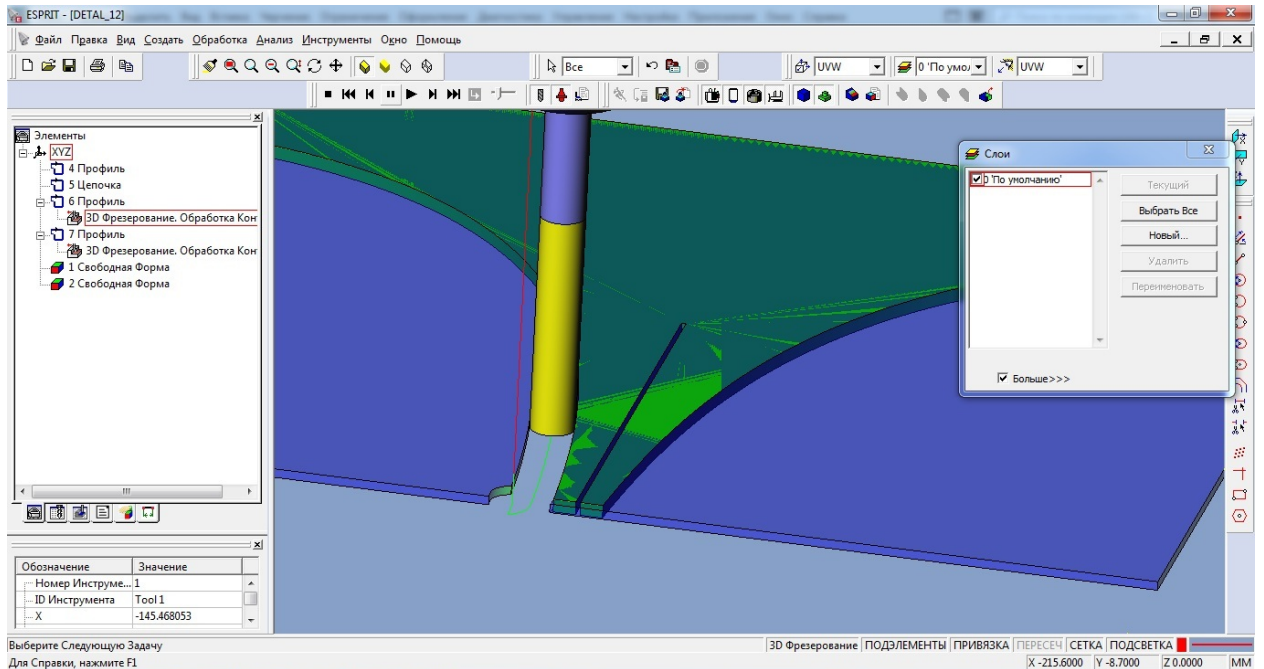


Рисунок 3.8 – Візуалізація процесу оброблення

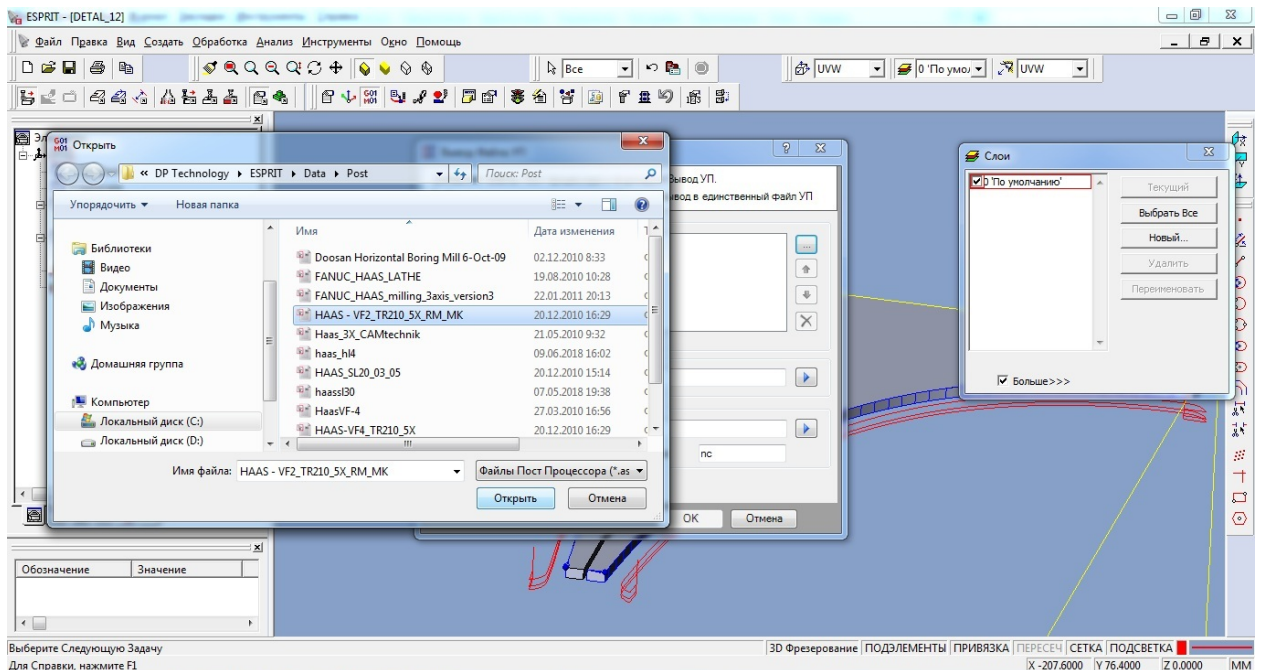


Рисунок 3.9 – Вибір постпроцесора та генерація програмного коду

Виконано автоматичне генерування програми оброблення в G-M кодї для оброблення на вертикально-фрезерному верстатї з ЧПК HAAS за допомогою постпроцесора. Програма оброблення наведена у додатку.

3.6 Проектування верстатного пристрою

Вибір, конструювання та розрахунок верстатного пристрою для фрезерування контуру та пазу шириною 1 мм. Вибір, конструювання та розрахунок верстатного пристосування для фрезерування пазів шириною 3 мм, яке здійснюємо на вертикально-фрезерному верстатї з ЧПК HAAS проведемо за методиками, викладеними в [12]. При фрезеруванні виникає зсувна сила $P_{різ}$, яка прагне змістити заготовку (див. рис. 3.10).

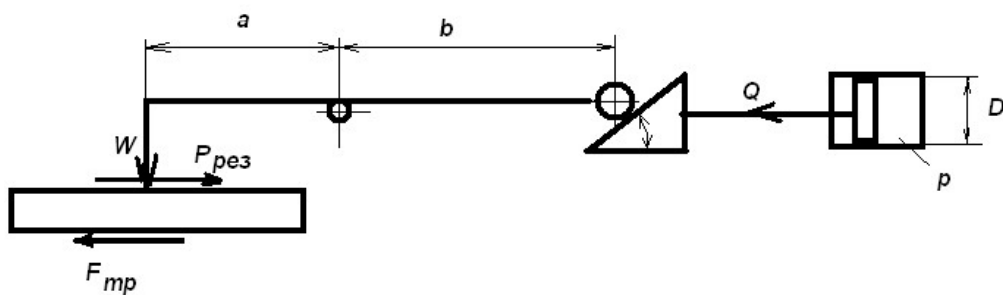


Рисунок 3.10 – Схема пристосування та сили закріплення деталі

Умова закріплення деталі при обробленні деталі виглядає так:

$$P_{тр} \geq K \cdot P_{рез} \quad (3.1)$$

де $P_{терт}$ – сила тертя між деталлю та пристроєм,

K – коефіцієнт запасу міцності, $K=2,5$;

P – складова сили різання при фрезеруванні контуру

$$P_{різ} = 1,41Pz = 1,41 \cdot 163 = 230 \text{ Н.}$$

$$P_{терт} \geq 2,5 \cdot 230 = 575 \text{ Н}$$

Силу тертя розраховуємо за наступною формулою:

$$P_{\text{терт}} = \mu \cdot W. \quad (3.2)$$

де μ - коефіцієнт тертя,

W – сила притискання заготівні до поверхні пристрою, яка залежить від співвідношення плечей коромисл і клинового передвального вузла.

$$W = P_{\text{мп}} / \mu = 575 / 0,1 = 5750 \text{ Н}$$

Тоді визначимо необхідну величину зусилля на штокові гідроциліндра:

$$Q = W \times (a/b) \times \text{tg}(\alpha + \varphi), \quad (3.3)$$

де a, b – величини плечей важеля,

α – кут клину,

φ – кут тертя у клиновому з'єднанні

При $2a = b$, і $\alpha = 15^\circ$, $\varphi = 6^\circ$ отримаємо:

$$Q = 5750 \times (1/2) \times \text{tg}(15^\circ + 6^\circ) = 1142 \text{ Н},$$

Зусилля на штокові розраховуємо за наступною формулою:

$$Q = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot p}{4} \eta, \quad (3.4)$$

D - діаметр пневмоциліндра, мм;

d – діаметр штока пневмоциліндра, мм;

Оскільки повітря подається у ту частину циліндра де відсутній шток, приймаємо конструктивно $d = 0 \text{ мм}$.

p – тиск у мережі пневмосистеми, МПа; (згідно ДСТУ 18829:2019 вибираємо тиску у пневмосистемі $p = 6,3 \text{ МПа}$).

$\eta = 0,95$ - коефіцієнт корисної дії пневмоциліндра.

Із наведеної формули визначено діаметр поршня пневмоциліндра:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{p \cdot \eta}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 142}{3,14 \cdot 0,95}} = 48,5 \text{ мм} \quad (3.5)$$

Приймаємо діаметр поршня пневмоциліндра із стандартного ряду - 50 мм, діаметр штока приймаємо – 16 мм. Перевіримо зусилля затиску заготовки із урахуванням того, що робоча порожнина пневмоциліндра – безштокова.

Перевірка:
$$Q = \frac{3,14 \cdot (50^2) \cdot 3}{4} \cdot 0,95 = 1175 \text{ Н}$$

Таким чином встановлено, що зусилля, яке розвивається, на штокові більше необхідного, отже, пристосування вважається працездатним. Так як необхідно фрезерувати складнопрофільну поверхню розмістимо наш пристрій на поворотному столі. І встановимо по центруючій втулці, щоб зменшити можливі усунення. Необхідна точність деталі, що виготовляється в пристосуванні забезпечується вибором необхідної схеми пристосування за якою дійсні похибки базування заготовки в пристосуванні були б меншими (або рівними) допустимим значенням похибки базування. Визначимо можливість установки деталі у верстатному пристосуванні з тим, щоб забезпечити розташування пазу щодо осі деталі із відхиленням $\delta=0,4$ мм.

$$\xi_y + \Delta_n + \Delta_{пр} \leq \delta \quad (3.6)$$

де δ - допуск оброблюваного розміру, $\delta=400$ мкм (див. кресленик);

ξ_y – похибка встановлення;

Δ_n – похибка налаштування по отвору, $\Delta_n=50$ мкм [12]

$\Delta_{\text{пр}}$ – похибка виготовлення пристосування, яка залежить від похибки виготовлення та збирання елементів пристосування. $\Delta_{\text{пр}}$ становить від 1/3 до 1/10 допуску оброблюваного розміру a [12]: $\varepsilon_{\text{пр}} = 1/10 \times 400 = 40$ мкм.

$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_0^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_{\text{пр}}^2} \quad (3.7)$$

де ε_0 – похибка базування по отвору: [12].

$$\varepsilon_0 = 0,5(\text{TD}_{9_{52}} + \text{TD}_{8_{52}}) = 0,5 \cdot (74 + 46) = 60 \text{ мкм}, \quad (3.8)$$

$\text{TD}_{9_{52}}$ - допуск на оброблення отвору. $\text{TD}_{9_{52}} = 74$ мкм.

де $\text{TD}_{8_{52}}$ – допуск на оброблення бічних поверхонь, $\text{TD} = 46$ мкм,

ε_3 – похибка закріплення заготівлі, $\varepsilon_3 = 0$, так як зусилля закріплення перпендикулярне розрахованій похибці [13]:

Тоді за формулою 3.8 отримаємо:

$$\varepsilon_y = (60^2 + 0^2 + 40^2)^{0,5} = 72 \text{ мкм}$$

Перевіряємо нерівність 3.6: $72 + 50 + 40 = 162$ мкм < 400 мкм. Виходячи із отриманого результату отримаємо, що даний пристрій задовільняє умовам точності оброблення.

4 ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

4.1 Проведення операцій розкрою

Струменево–абразивна та лазерна операції розкрою використовуються на етапах отримання заготовок для деталей з препрегів, вуглепластиків та склопластиків, у тому числі і при пакетному різанні.

В даний час все ширше застосування знаходять гідроабразивна та лазерна технології обробки (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Процес виготовлення зразка із склопластику Ø100 мм лазерним способом (а) та перспективний спосіб здійснення обробки – гідрорізання (б)

У зв'язку з тим, що при лазерній обробці температура плавлення волокон набагато вища, ніж температура плавлення смоли, лазерне різання армованого скловолокном пластику та вуглецевого волокна є складним завданням, оскільки пластмаса має тенденцію обвуглюватися на різучій кромці. Найкращі результати показані під час проведення різання за допомогою лазерів з дуже високою піковою потужністю та короткою довжиною імпульсу – наприклад, фірми Laser Nureg Rapid. Якщо процес відбувається при високій швидкості повторень, то хороша якість розкрою може бути досягнута з використанням методу багатопрохідного різання. Оптимальних результатів досягнуто також за допомогою довжини хвилі лазера в УФ діапазоні, наприклад – від лазера марки AVIA. Недоліком даного методу є низька ефективна швидкість різання та тривалий цикл обробки.

Таким чином, спосіб багатопрохідного різання використовується головним чином для матеріалів невеликої товщини.

Порівняно з механічною вирізкою з подальшим фрезеруванням гідроабразивний процес є більш продуктивним, але є ряд обмежень при реалізації цього технологічного процесу. З боку виходу струменя рідини має бути вільне місце, тобто такий процес складно реалізувати при складанні, так як гідроабразивний струмінь буде нікуди виходити. Крім того, розріз на товстих матеріалах виходить не таким рівним, так як струмінь під час руху може відхилитися від прямої лінії і залишатимуться ризики. На початку процесу також виникає гідроудар, від якого може відбуватися розшаровування матеріалу з боку виходу струменя рідини.

Переваги та недоліки цих способів представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняльна характеристика способів обробки композитів

Вид обробки	Переваги	Недоліки
Механічна	Технологія обробки широко використовується і забезпечує високу точність при виготовленні деталей	Малий ресурс інструменту – притуплення кромки призводить до розшарування, наявності вирваних волокон, підвищення температури в зоні різання, що призводить до термічної деструкції матриці
Струменево–абразивна	Забезпечує різання пакетів великої товщини та високу продуктивність; точність при різанні з великими допусками	Підвищена шорсткість на поверхнях у зоні розрізу, небезпека насичення деталі водою
Лазерна	Висока швидкість і точність різання, немає обмежень за габаритами заготовок або деталей	Термічна деструкція матриці в зоні різання з незначною зоною оплавлення країв

4.2 Вибір та підбір інструменту для механообробки ПКМ

В даний час для механообробки ПКМ найбільш широко застосовується інструмент з алмазним напиленням або інструмент із твердосплавного матеріалу. Приклади такого інструменту представлені на рис. 4. Чим більша зернистість у інструмента з алмазним напиленням, тим більша кількість матеріалу, що знімається за один прохід, але при цьому знижується чистота оброблюваної поверхні. Для отримання якісного розрізу необхідно, щоб вибрали саме такий інструмент, який забезпечує необхідну якість і швидкість різання при оптимальній продуктивності.

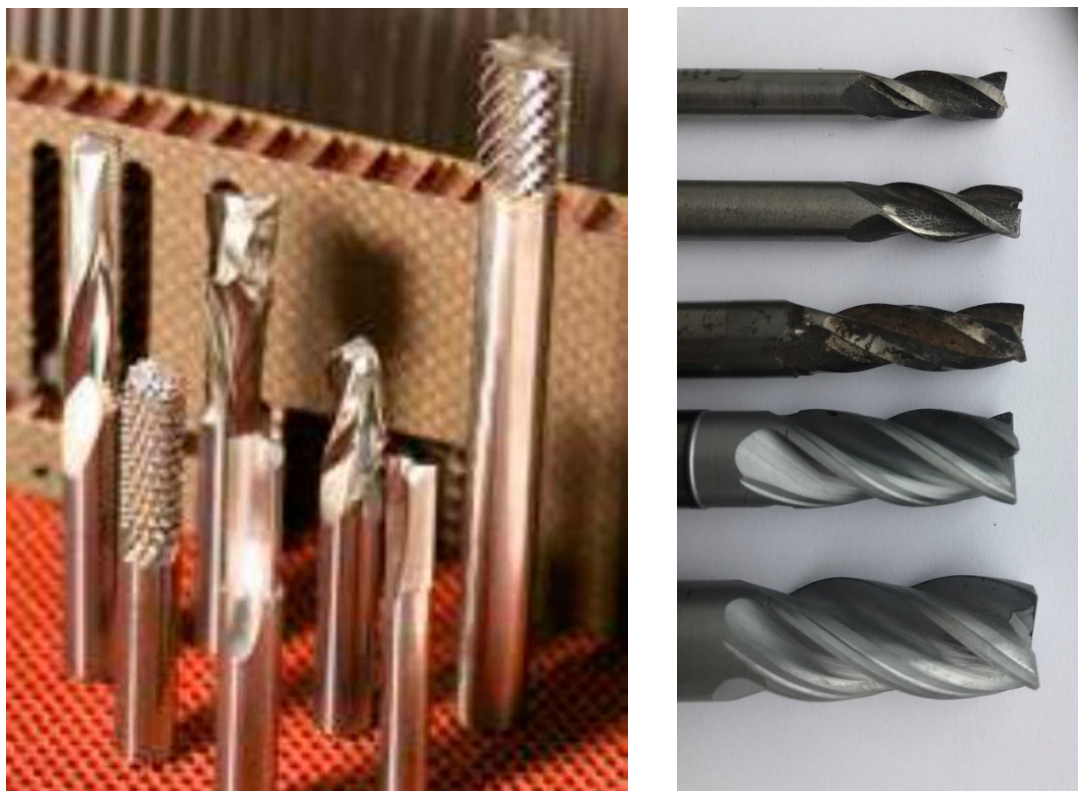


Рисунок 4.2 – Приклади інструменту для механічної обробки

При виборі інструменту слід враховувати особливості структури ПКМ. Чим в'язкіша матриця, тим сильніше йде нагрівання при різанні і відбувається налипання сполучного на ріжучу кромку з інтенсивним нагріванням інструменту і деталі, що позначається на якості поверхні зони різання.

Вибір інструменту не повинен бути обмежений лише твердосплавними свердлами, що не дозволяє дати об'єктивну оцінку оптимізації вибору марки та матеріалу свердла.

З урахуванням вимог, що пред'являються до якості отворів та режимів свердління, при проведенні експерименту зі швидкістю свердління 16000 і 26000 об/хв (при подачі на оборот 0,01–0,15 мм) вдалося отримати задовільну стійкість інструменту (750 отворів до його заміни).

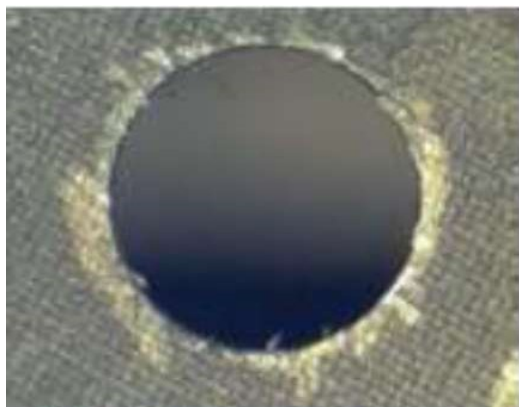
При використанні ручного електричного дреля, закріпленого на штативі, процес малопродуктивний з можливо нестабільною якістю результатів у виробництві.

При виготовленні деталей літакових конструкцій одним із масових процесів механічної обробки ПКМ є свердління. При виконанні отворів необхідно враховувати їх функціональне призначення – отвори для складання силових елементів конструкцій, функціональні (для переливу палива, шумопоглинаючих панелях, зливу конденсату тощо) і технологічні. У кожному з цих випадків вимоги щодо якості отворів визначаються вимогами конструкторської документації. Якість отворів по вхідних і вихідних кромках, точність і чистота поверхні циліндричної частини отвору надзвичайно важливі з точки зору надійності, довговічності та працездатності конструкції. Максимальну продуктивність та стабільну якість наскрізних отворів у ПКМ забезпечує правильно підібраний інструмент та режими різання при свердлінні, а також конструктивна жорсткість технологічного оснащення. Велику роль у забезпеченні якості поверхні отвору відіграє стійкість та геометрична форма ріжучих кромки інструменту.

Основними дефектами, що виникають при механічній обробці, є: розтріскування сполучного, розшарування, висмикування волокон, непроріз волокон, термічна деструкція сполучного. Ріжуча кромка зазвичай тендітно руйнує матрицю (сполучна) і зрізає армуючі волокна. Для усунення цих дефектів використовують спеціальні конструкції інструментів, оптимізують

їхню геометричну форму, технологічні режими свердління, використовуючи спеціальні пристосування.

При свердлінні ПКМ часто виникають дефекти на вході та виході отвору, зумовлені особливостями силового впливу свердла на заготовку (рис. 4.3). На вході спостерігаються розшарування та розрив матеріалу, а на виході – розшарування та непрорізання волокон. Оскільки отвори є концентраторами напруг, такі дефекти сприяють зниженню втомної та статичної міцності конструкцій. Для мінімізації дефектів інструментальні фірми пропонують спеціальні конструкції сверدل.



а)



б)

Рисунок 4.3 – Місцеве відшарування (деламінація) шарів матеріалу при порушеннях режимів осьової подачі інструменту при свердлінні (а) та фрагменти волокон (сколи) на внутрішній поверхні отвору через зношування ріжучої кромки та порушення режимів свердління (б)

Типові вимоги до якості отвору:

- шорсткість $Ra < 4,8$ мкм;
- деламінація < 1 мм від діаметра отвору;
- відсутність сколів (рваних волокон в отворі).

При обробці ПКМ зниження якості отворів може відбутися задовго до поломки інструменту.

4.3 Підвищення продуктивності процесу різання

Прискорення подачі інструменту та швидкості різання підвищує продуктивність процесу, але важливішим фактором є якість отвору. Низька якість отвору призводить до необхідності двостадійної обробки різними інструментами. Приклад отримання якісного отвору при двостадійній обробці під час свердління представлений на рис. 4.4.

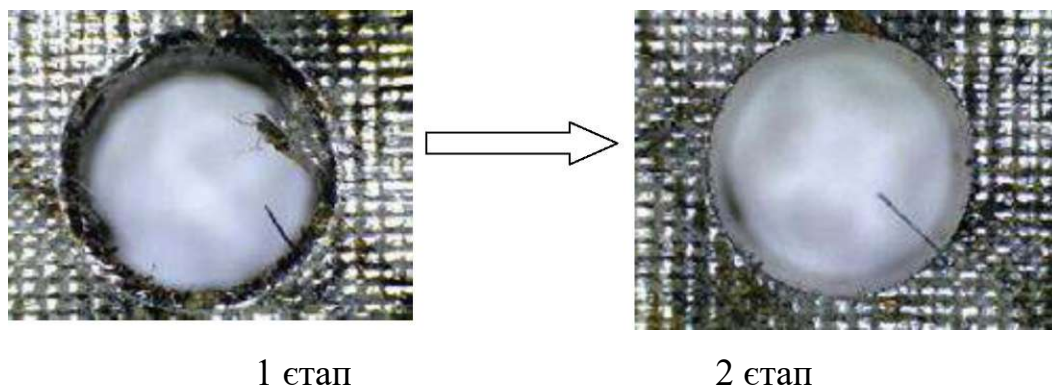


Рисунок 4.4 – Якість отворів при двостадійній обробці двома інструментами

На відміну від металів, ПКМ на полімерній матриці мають низьку теплопровідність і теплостійкість. При температурах $>(300-350)^{\circ}\text{C}$ починається термодеструкція сполучного. Це призводить до різкого погіршення якості обробленої поверхні, появи припалів та оплавлень у дефектному прикордонному шарі (рис. 4.5).

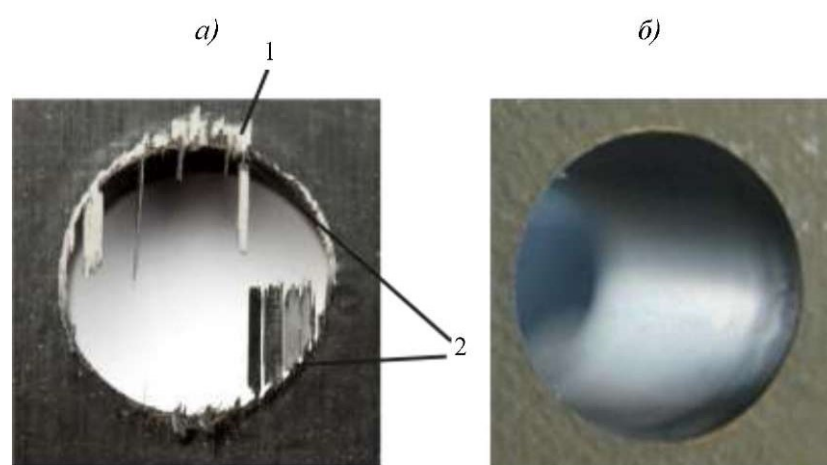


Рисунок 4.5 – Неякісний (а) та якісний (б) отвори у вуглепластику:

1 – розшарування матеріалу; 2 – непроріз волокон

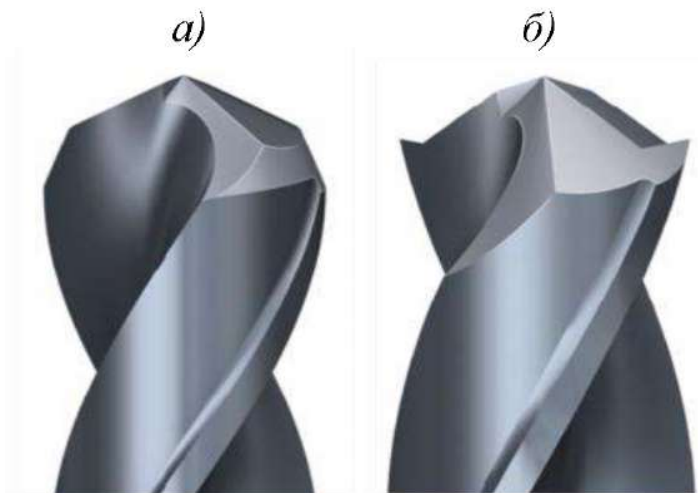


Рисунок 4.6 – Свердла для ПКМ із подвійним заточуванням (а) та з підрізними кромками (б)

Для зменшення розшарування на вході отвори використовують свердла з подвійним заточуванням, а для усунення непрорізу волокон – свердла з гострими кромками на периферії (рис. 8). Щоб уникнути розшарування, іноді доводиться використовувати кондуктори, притискані до поверхні із зусиллям, достатнім запобігання розшарування. Свердління зазвичай здійснюють зі швидкостями різання 100–200 м/хв за низьких величин подачі в діапазоні 0,02–0,1 мм/об. На вході та виході свердла для виключення розшарування знижують зусилля та величину подачі на оборот.

4.4 Вибір стратегії процесу під час свердління ПКМ

Верхня та нижня поверхні деталі істотно відрізняються за якістю вхідний та вихідний кромки отворів при свердлінні. Для підвищення якості отворів використовують ряд технологічних прийомів: напрямок свердління, захист поверхонь технологічними накладками та ін. Покриття або додаткові поверхневі шари над шаром вуглеволокна або склотканини можуть значно впливати на продуктивність та якість свердління.

Так, блискавкозахисний шар у вигляді дрібної або великої мідної сітки (рис. 4.7, а) дозволяє свердлити вуглепластик з прискореною подачею без втрати якості отвору; склотканина – підвищує ризик деламінації, погіршення якості (рис. 4.7, б). Обидва матеріали можуть легко оброблятися при правильному виборі інструменту та режимів обробки.

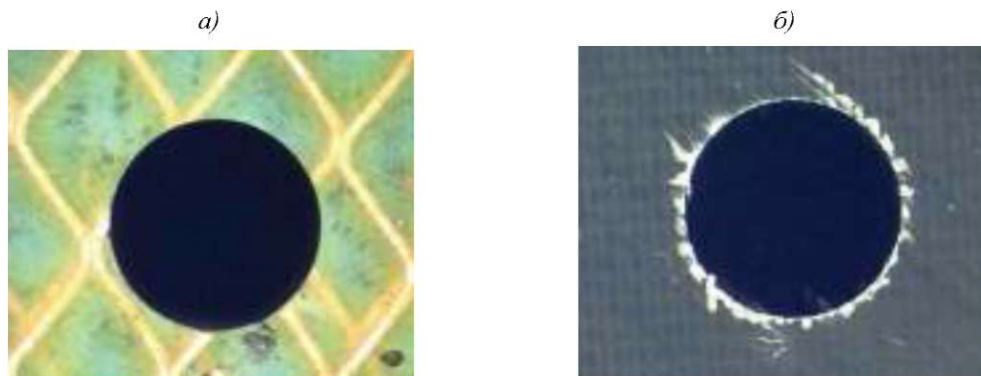


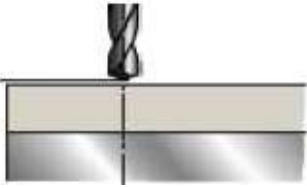
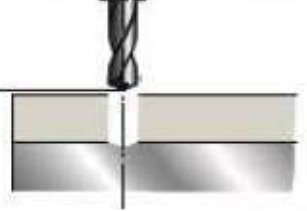

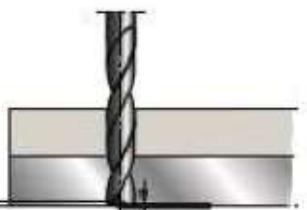
Рисунок 4.7 – Блискавкозахисний шар на вуглепластику (а) та вуглепластик із шаром склотканини (б)

При обробці ПКМ мастильно–охолоджувальна рідина, як правило, не застосовується, тому продукт різання є дрібнодисперсним пожежонебезпечним і шкідливим для здоров'я людини пилом, який необхідно видаляти із зони різання спеціальною системою видалення пилу. При обробці деталей з ПКМ обсяг різання зазвичай невеликий: деталі вже відформовані і потрібно лише, як в даному випадку, свердління отворів складальних або отворів у вигляді перфорації – наприклад в шумопоглинаючих панелях.

Найкращі результати можна отримати при свердлінні малих отворів через алюмінієву прокладку–кондуктор.

Як приклад пропонується технологічний цикл свердління отворів у пакеті з вуглепластику на основі сполучних нового покоління типу ВСЕ–1212 або ВСЕ–34 для отримання перфорованої обшивки (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Технологічний цикл свердлення отворів у пакеті із вуглепластика для отримання перфорованої обшивки

Технологічна операція	Ескиз процесу свердлення
Підведення свердла з прискореною подачею на відстань 2,5 мм від поверхні деталі	
Початок циклу переривчастого свердління (з періодичним виведенням свердла) з глибиною врізання, мм: – 1 (для титану); – 3 (для алюмінію)	
Свердління отвору у вуглепластику, поки вершина свердла не опиниться на відстані 0,5 мм від шару металу	
Зменшення подачі на виході з отвору з метою зменшення ризику деламінації та утворення сколів	

Композиційні матеріали на основі полімерної матриці, одержувані із застосуванням аріamidних скляних або вуглецевих волокон на епоксидній, фенольній або поліамідній смолах, найчастіше обробляють методами різання, включаючи розкрійні операції (пилами з швидкорізальних сталей і твердих сплавів, ножовий різкий, ультразвуковий кругами та алмазним дротом), обробку отворів, контурне фрезерування, фрезерування поверхонь та конструктивних елементів, точіння та шліфування тіл обертання.

Для обробки ПКМ за допомогою лез потрібно використання інструменту з дуже гострою ріжучою кромкою, великим заднім кутом і

малим радіусом ріжучої кромки для забезпечення зрізу волокон з низькою шорсткістю робочих поверхонь, для поліпшення відведення стружки і зниження тертя сил між поверхнями інструменту і заготівлі. Крім того, важливо забезпечити високу стійкість інструменту, оскільки армуючі волокна та компоненти матриці ПКМ можуть інтенсивно зношувати ріжучу кромку, що призводить до збільшення сили різання та тепловиділення, а також зниження якості оброблених поверхонь. Як інструментальні матеріали, що забезпечують прийнятну зносостійкість, використовують тверді сплави, тверді сплави з зміцнюючими покриттями, кубічний нітрид бору, спечені полікристалічні і CVD–алмази. Перспективним є інструмент з алмазними, одержуваними за технологією CVD, а алмазоподібними покриттями (АПП).

В якості ілюстрації при відпрацюванні режимів свердління з метою перфорування обшивок випробувані режими свердління в тонкостінних обшивках ($h = 0,6$ мм) з вуглепластику на основі сполучного епоксидного. У зв'язку з малим діаметром отворів (2 мм) і тонкістю обшивок звукопоглинаючих конструкцій багат шарових панелей обрані чотири види сверدلів:

- твердосплавні із сплаву марки ВК6М;
- із швидкорізальної сталі марки Р6М5;
- спіральні твердосплавні марки СЦЦ528 і СЦЦ513;
- спеціальні твердосплавні марки НАМ Prima 380.

Проведено порівняльну оцінку працездатності чотирьох видів сверدلів на технологічну стійкість за умови якісного отримання отворів вибраним інструментом з використанням ручного електричного дреля при його фіксованому положенні, що забезпечує вертикальне переміщення. Для порівняльної оцінки застосовували три режими свердління: 8000; 16000 та 26000 об/хв (з єдиною величиною вертикальної подачі на оборот).

При використанні перерахованих вище сверدلів, на швидкості 8000 об/хв отвори виходять неякісними з задирками на виході свердла на нижній стороні обшивки. Крім того, свердла марок СЦЦ 528 і СЦЦ513 не

дозволяють отримати якісний отвір Ø2 мм через “дроблення” свердлів та їх недостатню конструктивну жорсткість при свердлінні.

Найкращі результати за підсумками роботи показали свердла марки НАМ Prima 380. Критерій їхньої оцінки на зносостійкість – початок появи задирок на виході свердла з деталі. Вплив режимів свердління як при 16000 об/хв, так і при 26000 об/хв, на якість отворів до появи задирок свердлами даної марки не виявлено. Технологічна стійкість свердлів цієї марки прийнята – до 750 отворів. Свердла даної марки 02 мм можна рекомендувати для перфорації отворів в тонкостінних вуглепластикових пластинах за режимами свердління – з 16000 до 26000 об/хв.

Якість кромки отвору необхідно періодично перевіряти на вході та виході інструменту. Залежно від стану кромки може виникнути необхідність зміни режимів різання, або заміни свердла. Якість кромки на виході свердла важче забезпечити через великі сили різання і малу міцність при відшаруванні на виході інструменту з пластини.

Свердління – найбільш поширена операція при механічній обробці деталей із ПКМ. При виконанні цієї операції має місце сколювання та відшарування матеріалу при вході та виході свердла з отвору. У цьому випадку перед технологами у виробництві ставиться непросте завдання – отримати отвір, що задовольняє вимогам щодо точності та шорсткості, а також уникнути пошкоджень поверхонь по кромках та біля зони отвору.

Інструменти зі вставками з полікристалічного алмазу (PCD) або твердосплавні свердла з алмазним напиленням спеціально розроблені для збільшення технологічного циклу інструменту, оскільки алмаз має відмінну стійкість при обробці різних типів вуглецевих волокон і пакетної обробки різноманітних матеріалів, включаючи титан. Для досягнення високої продуктивності при обробці кромки деталей з ПКМ доцільно застосовувати фрези з пластинами з алмазу полікристалічного PCD або твердого сплаву з алмазним напиленням.

Підвищення ефективності операцій свердління отворів різних ПКМ може бути досягнуто шляхом застосування спеціалізованих сверدل, індивідуально розроблених для кожної групи матеріалів. Для обліку специфічних вимог та особливостей обробки кожного матеріалу підбирається геометрична форма свердл, яка оптимізована завдяки використанню різних значень передніх кутів та кутів при вершині.

Застосування нових свердлів та фрез дозволяє підвищити якість механічної обробки важкообробних матеріалів. Твердосплавні свердла з алмазним напиленням, а також із вставками з полікристалічного алмазу ідеально підходять для отримання високоякісних отворів у композитах. Усі геометричні форми цих нових серій свердлів розроблені з урахуванням специфічних вимог та особливостей обробки кожного конкретного матеріалу. Ефективність фрезерування та обробки кромки деталей із ПКМ можна значно підвищити шляхом застосування фрез із PCD–пластинами. Стандартні та спеціальні інструменти, що використовуються, створюють сприятливі технічні можливості для свердління та фрезерування композитів з отриманням отворів високої якості, що економічно дуже вигідно.

Немаловажну роль відіграють конструктивні особливості спроектованих деталей, що дозволяють оптимізувати технологічний процес обробки заготовок із ПКМ. Процеси механічної обробки деталей із ПКМ нічим не відрізняються від обробки традиційних матеріалів за способами обробки – фрезерування, свердління, точення тощо.

Однак особливості ПКМ (шаруватість, неоднорідність – матриця і наповнювач, різні механічні властивості у структурі “матеріалу” тощо) вимагають особливих підходів у виборі режимів різання, доборі інструменту, способах різання. Простота технологічного процесу свердління отворів в ПКМ, що здається, викликає масу проблем, пов’язаних з вибором інструменту, охолоджуючих рідин (або без їх застосування), режимів різання, оцінки стійкості інструменту, з вимогами до якості та точності поверхонь в

отворах та їх відповідності вимогам конструкторської документації з їх розмірів та інших вимог.

Проблеми механічної обробки ПКМ мають вирішуватися ні на стадії випуску креслень у виробництво, а на стадіях початку проектування конструкцій. У цей момент закладаються усі майбутні технологічні рішення, а також етапи підготовки виробництва, можливості контролю якості продукції, наявність технологічного обладнання та ін.

Оптимізацію робіт з механічної обробки деталей із ПКМ – поряд із загальними вимогами до створення технологічної конструкції та їх виробництва – можна представити за допомогою наступної спрощеної схеми:

- опрацювання конструкторської документації та розробка технологічних процесів, спрямованих на оптимізацію їхньої послідовності, вибору оснащення, технологічного обладнання, розробку маршрутних технологій з урахуванням вимог конструкторської документації та нормативних документів;

- проведення відпрацювання нових технологічних процесів для забезпечення вимог конструкторської документації на готових деталях;

- виготовлення дослідно–установної партії деталей, коригування та затвердження робочих технологій для серійного виробництва.

4.5 Експериментальні дослідження процесу фрезерування склопластика

У даний час композитні матеріали, зокрема склопластики, знайшли широке використання в різних галузях машинобудування завдяки їх унікальним властивостям, таким як: мала вага, висока корозійна стійкість, відносно висока міцність, хороші теплоізоляційні властивості. Сучасні технології дозволяють виготовити вироби зі склопластиків максимально наближеними до остаточної форми, проте повністю виключити механічну обробку не вдається. Зокрема, у багатьох випадках виникає необхідність в обробці фрезеруванням різних пазів, вікон, площин і уступів, які є або виконавчими поверхнями, або поверхнями, по яких здійснюється нероз'ємне

сполучення деталей. При цьому вимоги до точності обробки становлять 10-11 квалітети, до якості поверхні – R_a не більше 10 мкм (а в ряді випадків – не більше 2,5 мкм). Механічна обробка дещо відрізняється від обробки металів, що викликано рядом особливостей склопластиків: низька теплопровідність, абразивна дія наповнювача, руйнування структури полімерного сполучного при різанні та пружні властивості матеріалу [4].

Фрезерування композиційних матеріалів є складним і недостатньо вивченим процесом. Як показує виробничий досвід, прямий перенос традиційних режимів обробки металевих матеріалів на композиції неможливий із-за суттєвої відмінності їх фізичних і механічних властивостей. Композитні матеріали володіють підвищеною твердістю, що викликає підвищений розмір ре-жущего інструменту. Печатні плати для радіоелектронної апаратури традиційно виготовляються з фольгованого склотекстоліту. До фрезерних операцій над заготовками друкованих плат відносяться фрезерування плоскостей, уступів, пазів, скосов, а також фасонних поверхонь. При фрезеруванні склотекстолітів економічна точність обробки знаходиться в межах IT 10-12 з отриманням шерохватості обробленої поверхні $Ra=2,5\dots6,3$ мкм [1, 2].

Порівняно з точенням і свердлінням процес фрезерування має уривчастий характер. Внаслідок цього ймовірність сколювання оброблюваного матеріалу на кромках зростає. Тому при виконанні фрезерних операцій з обробки склотекстолітів необхідно дотримуватись наступних рекомендацій: 1) при закріпленні заготовки необхідно забезпечувати її щільне притискання до настановних елементів пристосування або столу верстата; 2) внаслідок шаруватої структури з метою уникнення розшарування необхідно використовувати попутну схему фрезерування; 3) оброблена ділянка деталі повинна повністю прилягати до базової (опорної) поверхні пристосування. При фрезеруванні склотекстолітів інструмент із швидкорізальної сталі не використовується у зв'язку з його низькою стійкістю. Застосовуються фрези, ріжуча частина

яких виконана із твердих сплавів вольфрамо-кобальтової групи або синтетичних алмазів [2]. Метод контурного фрезерування заготовок фасонних друкованих плат із склотекстолітів є відносно недорогим та універсальним. Цей метод обробки оптимальний для дослідного, одиничного та дрібносерійного виробництва.

Вибір різального інструменту для цих операцій досить важкий через специфічності оброблюваного матеріалу та наявності на ринку великого асортименту конструкцій, розроблених безпосередньо для обробки даного композиційного матеріалу.

Відповідно до існуючих рекомендацій з фрезерування склопластиків необхідно використовувати інструмент з гострою ріжучою кромкою, великим заднім кутом та малим радіусом ріжучої кромки. Для покращення відведення стружки та зниження сил тертя між поверхнями інструменту та заготовки передня та задні поверхні повинні мати низьку шорсткість. Крім того, важливо забезпечити високу стійкість інструменту, оскільки армуючі волокна інтенсивно зношують ріжучу крайку, що призводить до збільшення сили різання та тепловиділення, а також зниження якості оброблених поверхонь.

Основними дефектами, що виникають при механічній обробці, є: руйнування матриці, висмикування волокон, непроріз волокон, термічна деструкція матриці. Походження цих дефектів обумовлено особливостями лезової обробки склопластику. На відміну від металів склопластики володіють низькою теплопровідністю та теплостійкістю. У зв'язку з цим відведення тепла із зони різання разом зі стружкою і в оброблюваний виріб утруднюється, і, як наслідок, ріжучий інструмент працює в термічно напружених умовах.

Крім того, при температурах вище 300-350 °С починаються інтенсивна термодеструкція та розкладання полімерного сполучного, що призводить до його налипання на ріжучі кромки інструменту (рис. 2). Наявність розігрітого

сполучного в зоні різання також згубно позначається на стійкості інструменту, будучи причиною його адсорбційно-втомного зношування.

Збільшення температур у зоні різання також призводить до різкого погіршення властивостей матеріалу, появи припалів та збільшення дефектного шару (рис. 1).

Розшарування - це пошкодження, яке може виникнути в результаті механічної обробки армованих волокнами композитних матеріалів. Під час фрезерування/обрізання армованих волокном пластикових композитів існують різні типи деформації на обробленому краю CFRP, і їх можна класифікувати. Колліган і Рамулу [7] визначили чотири типи відшарування в процесі обрізання країв. Ці чотири типи розшарування описані як типи I, II, I/II та III. Типи розшарування схематично показано на малюнку 1. Розшарування типу I відбувається в областях, де поверхневі волокна зламані та видалені на деяку відстань усередину від обробленого краю. Відшарування типу II складається з нерозрізаних волокон, які виступають назовні з обробленого краю. Розшарування типу I/II відбувається в областях, де волокна зламані всередину та виходять назовні від краю обробки. Тип I/II є свого роду комбінацією типів I і II. Відшарування III типу описується як частково прикріплені волокна або тріщини, паралельні обробленій поверхні [7].

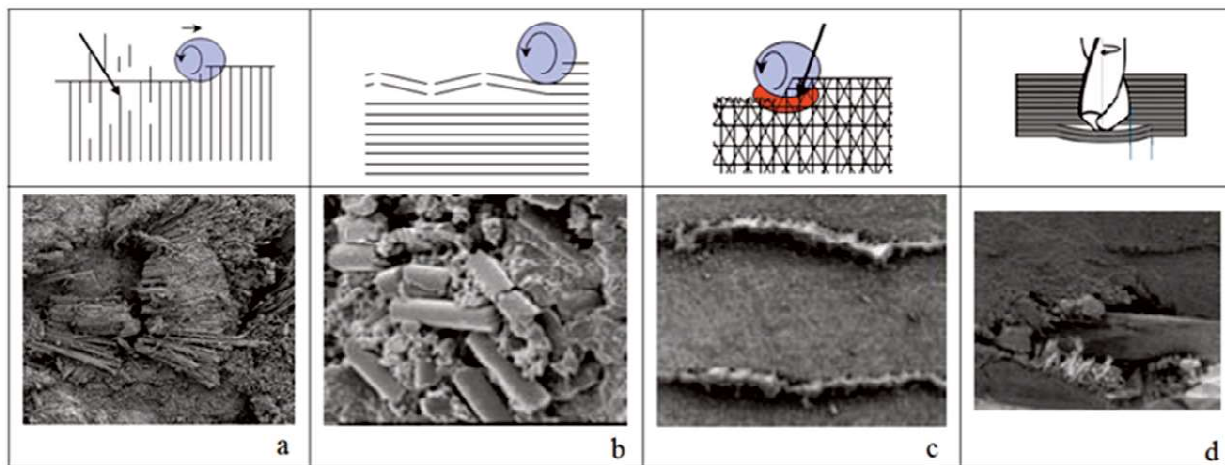


Рисунок 4.8 - Типові дефекти оброблення склопластику: а) вирив волокон, б) обрив волокна, в) размиття матриці, г) розслоювання

На додаток до типу інструменту, параметри процесу (такі як швидкість інструменту, подача та кількість матеріалу, що обробляється), які використовуються для обробки, однаково важливі. Вони впливають не тільки на якість одержуваної ріжучої кромки, але і на температуру процесу.

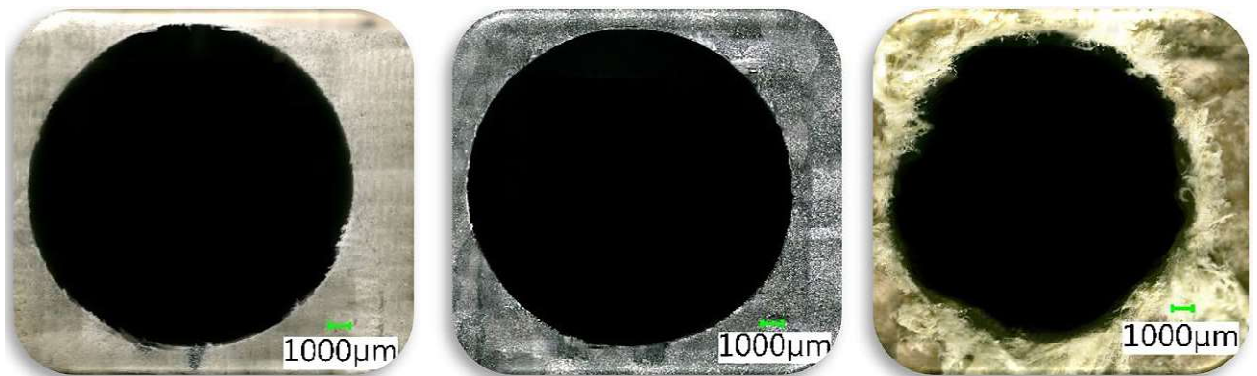


Рисунок 4.9 — Розшарування, припали обробленої поверхні

Типовими дефектами після фрезерної обробки друкованих плат є утворення кратера при першому торканні інструменту заготівлі; пошкодження струмопровідного шару притискним механізмом та робочою частиною столу (що є критичним під час виробництва радіоелектронної

апаратури); розлохмочування та розтріскування склотекстоліту. З метою зменшення ймовірності прояву зазначених дефектів використали пакет з кількох шарів, представлений на рис. 4. Матеріал верхньої та нижньої прокладок – склотекстоліт СТЕФ-1 завтовшки 1 мм, матеріал заготовки – фольгований склотекстоліт СТЕФ-1 завтовшки 1 мм.

Необхідність використання нижньої прокладки в пристрої обумовлена забезпеченням гарантованого зазору між інструментом і столом верстата. Необхідне відведення тепла із зони різання відбувається за допомогою двох повітряних потоків. Перший повітряний потік створює обертання шпинделя, другий повітряний потік створює механізм відведення дрібної стружки. Шар фольги забезпечує додаткове розсіювання тепла з поверхні склотекстоліту. При фрезеруванні склотекстоліту необхідний вибір оптимальної швидкості подачі: при занадто малій подачі окремі різальні кромки не зможуть достатньо глибоко проникнути в матеріал, що обробляється, і замість різання відбувається загладжування матеріалу. При цьому виникають перегрів матеріалу в зоні обробки та утворення плівки нагару на ріжучих кромках. При дуже великій величині подачі має місце різке зниження стійкості та збільшується ймовірність поломки фрези. Основні види дефектів торцевих поверхонь для обробки листового склотекстоліту представлені в табл. 4.3.

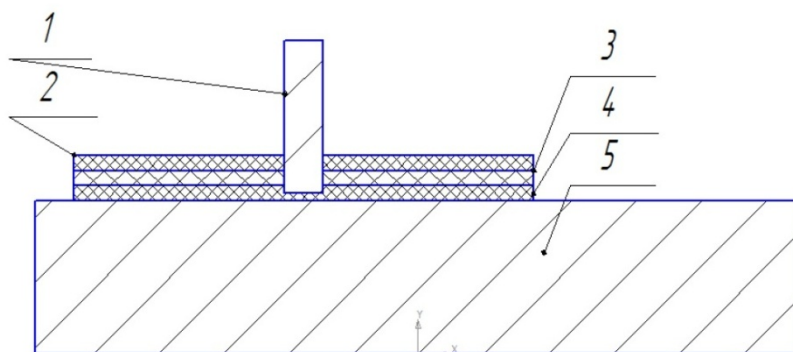
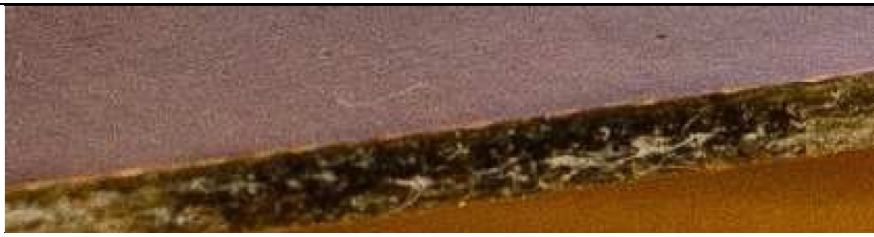





Рисунок. 4.10 - Схема контурного фрезерування склотекстоліту: 1 – фреза; 2 – верхня прокладання; 3 - оброблювана заготівля; 4 – нижня прокладка; 5 – стіл верстата

Таблиця 4.3 - Види дефектів поверхонь після фрезерування

№ п/п	Зображення дефекта	Найменування дефекта
1		Утворення припалу
2		Вирир волокон
3		Заглажування
4		Розтріскування

З метою зменшення зносу різальних кромek фрези та запобігання розтріскування матеріалу на початку контуру необхідно просвердлити отвір свердлом, рівним діаметру фрези. У деяких випадках використовують нижню прокладку в пакеті із заздалегідь відфрезерованим пазом, що сприяє кращому відведенню стружки та охолодженню інструменту.



Рисунок 4.11 — Двозуба кінцева фреза (інструментальний матеріал - Р6М5) після роботи при температурі понад 300°С

Крім цього, на сьогодні дуже мало довідкової літератури (за винятком окремих випадків) про призначення конструктивно-геометричних параметрів ріжучого інструменту та режимів різання. Ця література не враховує величезний обсяг марок склопластику, створений більш ніж за чотири десятиліття, що пройшли з 1974 року. І цей обсяг продовжує розширюватися високими темами: паралельно з розвитком відповідних галузей промисловості створюються нові матеріали з високими споживчими властивостями. Все це в багатьох випадках призводить до неефективності механічної обробки склопластиків. Якщо до обробки існуючих хоча б кілька років марок підприємства шляхом проб і помилок хоч якось адаптуються, то при впровадженні нових складнощів неминучі.

Методика експериментальних досліджень

Таким чином, для вирішення даних задач необхідні рекомендації щодо вибору конструктивно-геометричних параметрів ріжучого інструменту, а також призначення режимів різання. Основними завданнями експериментальних досліджень є:

- вивчення впливу режимних характеристик процесу фрезерування та конструктивно-геометричних параметрів інструмента на величину шорсткості обробленої поверхні та зношування інструменту;

- отримання емпіричних залежностей шорсткості обробленої поверхні від режимних параметрів процесу фрезерування та конструктивно геометричних параметрів;

- вивчення впливу режимних характеристик процесу фрезерування на величину температури в зоні різання;

- отримання емпіричних залежностей температури від режимних характеристик процесу фрезерування.

Для вирішення поставлених завдань була спроектована оригінальна конструкція фрези (рис. 4.12.), що представляє собою цільний циліндричний корпус 1 діаметром 50мм зі сталі 40Х зі спеціальними прямокутними пазами певної глибини, розташованими в шахматному порядку. У паз вставляється твердо сплавна пластинка 2, яка орієнтується під певним кутом ω парою клинів 3, після чого клини фіксуються гвинтами 4. Змінюючи геометрію вставних клинів і твердосплавної пластинки, можна варіювати кути ω , α , λ . Крім того, можна змінювати число зубів z .

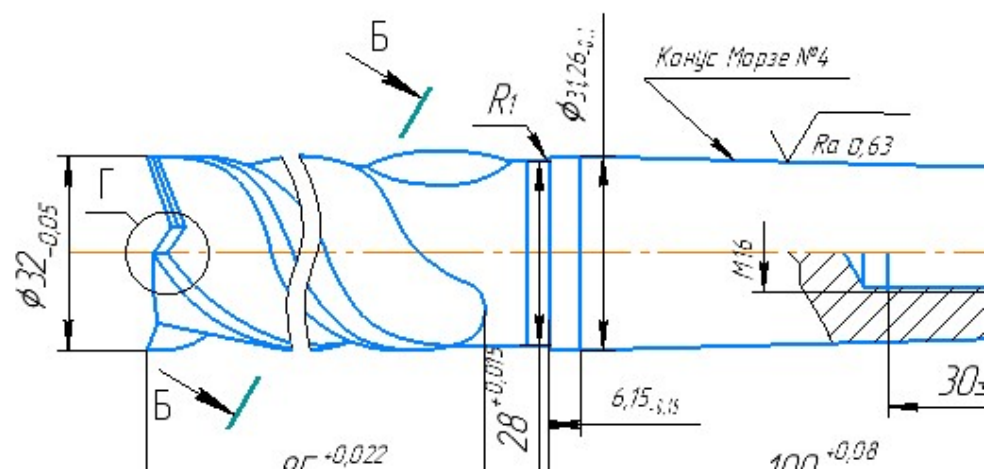


Рисунок 4.12 — Експериментальна фреза

У ході попередніх досліджень було виявлено, що дослідження процесу різання склопластику необхідно проводити з наступною геометрією інструменту:

1. Передній кут $\gamma=15^\circ$; задній кут $\alpha=20^\circ$; кут підйому гвинтової канавки $\omega=30^\circ$.

2. Передній кут $\gamma=10^\circ$; задній кут $\alpha=20^\circ$; кут підйому гвинтової канавки $\omega=30^\circ$. Як досліджуваний ріжучий інструмент були взяті кінцеві фрези діаметром 10 мм із твёрдосплавного матеріалу марки ВК8 у тризубому виконанні, призначені для обробки уступів, площин, пазів та закритих контурів (рис. 4).

Технічні вимоги до фрез визначаються згідно з ДСТУ 18941:2008. Твердість робочої частини не більше 88-91 HRA, хвостовики - 37-53 HRC. Параметри шорсткості: передньої та задньої поверхонь головних ріжучих кромки - не більше $Ra=0,32$ мкм; циліндричної частини хвостовика, поверхонь допоміжних ріжучих кромки і фаски - $0,63$ мкм; інших поверхонь — $Rz=20$ мкм. Як експериментальні приклади для проведення досліджень були обрані труби, виготовлені з композиційного матеріалу з косою поздовжньопоперечною намоткою волокон (КППН), що забезпечує фізико-механічні властивості, зазначені в таблиці 4.4.



Рисунок 4.13 — Ріжучий інструмент

Таблиця 4.4 – Фізико-механічні властивості матеріалу

Властивості	В тангенціальному напрямку	В осьовому напрямку
Межа міцності, Па	$4,6 \cdot 10^8$	$8,8 \cdot 10^8$
Модуль пружності при розтягуванні, Па	$3,43 \cdot 10^{10}$	$1,28 \cdot 10^{11}$
Щільність, кг/м ³	$1,97 \cdot 10^3$	

Експериментальні дослідження проводились з використанням методики планування експерименту (дрібнофакторний експеримент). Достатність повторюваності дослідів оцінювалася за однорідністю дисперсій (критерій Кохрена). Розраховувалися коефіцієнти розмірної моделі. Значимість коефіцієнтів моделі оцінювалася за критерієм Стюдента, адекватність моделі реального процесу - за критерієм Фішера.

▣ Параметрами, що варіюються, прийняті режими різання: швидкість різання V , м/хв, подача S , мм/зуб, і глибина фрезерування t , мм. У процесі експериментів контролювали наступні параметри: зношування інструменту Δ , мкм, шорсткість обробленої поверхні Ra , мкм, і глибину дефектного шару h , мкм. У таблиці 2 представлена матриця планування експерименту [4]



Рисунок 4.14 – Налагодження верстата на оброблення

Таблиця 4.5 – Матриця планування експериментальних досліджень

№	Параметри, що варіюються		
	V , м/хв	S , мм/зуб	t , мм
1	-	-	+
2	-	+	-
3	+	+	+
4	+	-	-

Для визначення інтервалів варіювання факторів було проведено інформаційний пошук, а також серія попередніх експериментів. Таким чином, інтервал варіювання швидкості різання — $V=63 \dots 200$ м/хв, подачі - $S = 0,02 \dots 0,1$ мм/зуб, глибини фрезерування — $t=1 \dots 10$ мм. Нижні межі інтервалів варіювання визначаються мінімальною продуктивністю, верхні – якістю обробленої поверхні [3].

Дослідження проводилися на фрезерувальному верстаті HAAS VF3, оснащеному системою ЧПК FANUC. Заготовка закріплювалася на столі верстата за допомогою трьохкулачкового патрона, що самоцентрується. Рух подачі реалізовувався шляхом гвинтовій інтерполяції. Загальний вигляд налагодження верстата представлено на рис. 5. Для контролю температури в зоні різання був використаний інфрачервоний термометр моделі KIRAY 300 з роздільною здатністю $0,1^{\circ}\text{C}$. Контроль зношування інструменту здійснювався на інструментальному мікроскопі з ціною поділки $0,05\text{ мм}$.

Результати дослідження залежності температури від режимів різання подано як графіків на рисунку 4.15.

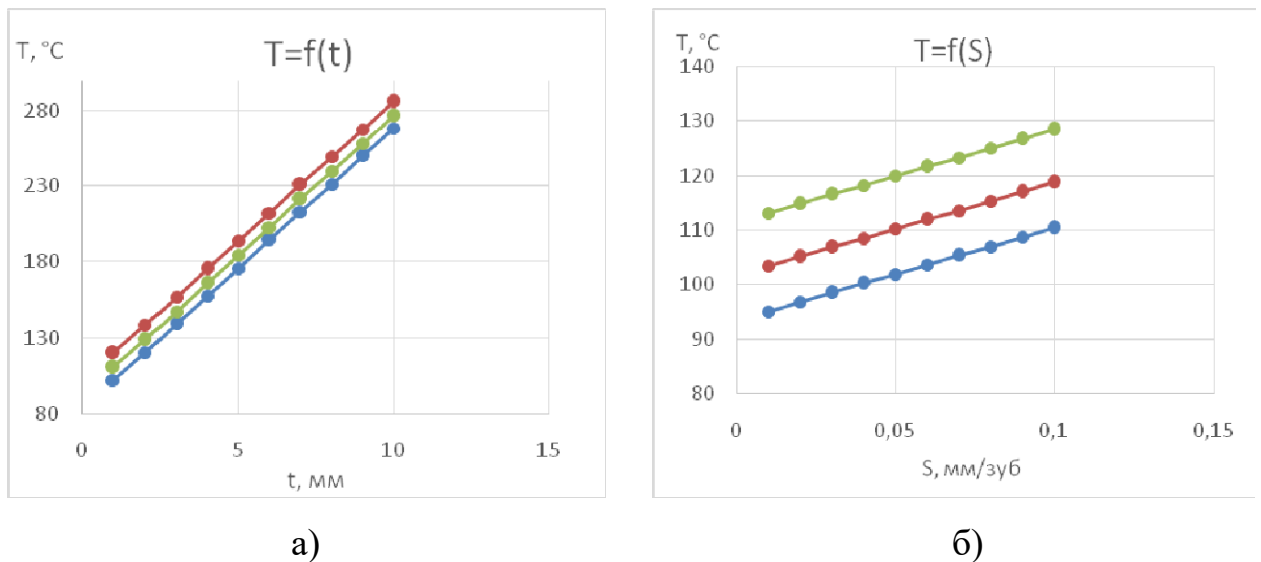


Рисунок 4.15 – Зміна температури залежно від режимів різання:

а - від подачі (при $t = 5\text{ мм}$); б - від глибини різання (при $S=0,06\text{ мм/зуб}$)

Як видно з графіків, на інтервалі часу механічної обробки склопластику, що розглядається, виявлено лінійний зв'язок між зміною температури та режимними характеристиками, зокрема глибиною фрезерування t і подачею на зуб S . Математична обробка отриманих експериментальних даних дозволила отримати емпіричну залежність температури від режимних характеристик процесу фрезерування:

$$T=A+B(\tau)$$

$$A=-127,141+0,872416V+1074,219S+3,5926t$$

$$B=-75,1027+0,304139V+621,5419S+4,467903t,$$

де τ — час обробки, хв.

Результати дослідження залежності зношування інструменту по задній поверхні від режимів різання представлені у вигляді графіків на рисунку 7.

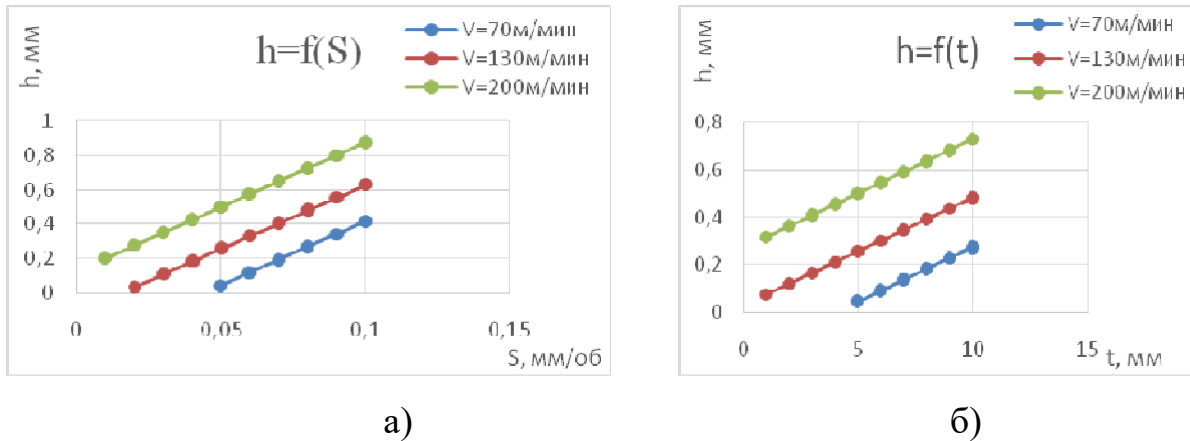


Рисунок 4.16 — Залежність зношування інструменту по задній поверхні від режимів різання: а - від подачі (при $t=5$ мм); б - від глибини різання (при $S=0,06$ мм/зуб)

З графіків видно, що на інтервалі часу механічної обробки склопластику, що розглядається, виявлено лінійний зв'язок між зміною зношування по задній поверхні та режимними характеристиками, зокрема глибиною фрезерування t і подачею на зуб S , причому зношування більшою мірою залежить від подачі на зуб S . Математична обробка отриманих експериментальних даних дозволила отримати емпіричну залежність зношування від режимних характеристик процесу фрезерування:

$$h=A+B(\tau),$$

$$A=-0,04505+0,00022V+0,088125S+0,0060039t,$$

$$B=-0,115069-0,000565V+1,468125S+0,007906t;$$

де τ - час обробки, хв.

Для оцінки якості обробленої поверхні необхідно знати розподіл температурного поля по тілу заготовки та інструменту. Це дозволить прогнозувати появу припалів, величину дефектного шару, конструктивно геометричні параметри, а також попереджати передчасний вихід з ладу ріжучого інструменту.

Висновок

При проектуванні операцій фрезерування склопластиків необхідно враховувати низку особливостей, таких як низька теплопровідність, абразивний вплив наповнювача, руйнування структури полімерного сполучного при різанні та пружні властивості матеріалу. З урахуванням даних особливостей була запропонована конструкція збірної фрези, яка дозволяє експериментальним шляхом установити оптимальні геометричні параметри інструменту для досягнення даних вихідних параметрів фрезерування. На основі даних експериментів отримані залежності, що дозволяють оцінити вплив режимних параметрів на період стійкості ріжучого інструменту. При цьому на температуру найбільший вплив має глибина фрезерування, а на зношування по задній поверхні - подача на зуб.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ НА ВИРОБНИЦТВІ

5.1 Аналіз технологічного процесу з точки зору охорони праці

Для вірної організації робочого місця необхідно забезпечити правильне планування робочого місця та раціональне оснащення його відповідним сучасним обладнанням та технологічним оснащенням; оптимальні просторові положення матеріальних засобів виробництва; раціональні кольорові фарбування обладнання; нормовані освітлення робочих місць.

При плануванні місця робітника необхідно передбачати можливості виконання його раціональних рухів, що необхідно при виконанні професійних задач; найбільш економічне використання виробничих площ та скороченні шляхів переміщення робітників під час транспортування деталей; раціональне розташування обладнання та оснастки відповідно до послідовності технологічного процесу; загальні фізіологічні та антропометричні дані людини (зріст, розмах рук та інше).

При обробці заготовки деталі плата у технологічному процесі використовуються вертикально-фрезерні верстати з ЧПК та вертикально-свердловальні верстати з ЧПК.

Загальні вимоги безпеки, що висуваються до металорізальних верстатів, визначені ДСТУ 12.2.009-98. Додаткові вимоги, що залежать від умови експлуатації та особливостей конструкції, наведені у технічній документації по верстатах.

У механічному цеху повинні застосовуватись як технічно обладнанні засоби і організаційні міри безпеки по попередженню травматизму - огороження небезпечних зон (рухомі частини верстатів і механізмів, ріжучі інструменти, струмопровідні частини електроустаткування; зони високих температур і шкідливих виділень); - використанні запобіжника (від перевантажень верстатів, від переходу рухомої частини за встановлені межі, від непередбачуваного підвищення або падіння тисків чи напруги електроенергії); сигналізація безпеки.

Для усіх робітників передбачно зручні робочі місця, що не обмежують його дії під час виконання роботи.

Розміщене устаткування виключає необхідне перебування робітників у небезпечній зоні. Повинні бути безпечним для робітників та для осіб, які можуть знаходитись поблизу небезпечної зони.

Відстані між верстатами, від верстатів до стін і колон приміщення, а також ширина цехових проїздів і проходів повинні відповідати нормам.

Для всіх механічних операцій небезпечною є зона різання, тому слід додержуватись правил експлуатації конкретного виду обладнання. Небезпеку створюють органи верстатів, що рухаються та пристрої для закріплення інструменту або деталі.

Металорізальне обладнання: верстати, преси та інше устаткування повинні бути встановлені на міцних основах або фундаментах; допускається встановлення на віброопорах.

Всі дверцята та кришки, що мають змогу зніматися, повинні мати пристрої, що запобігають їх самостійному відчиненню під час праці обладнання;

Огородження, що можуть відкриватися під час роботи обладнання, мають бути заблоковані з пуском на верстаті;

Виступаючі частини валів та кінців, що обертаються, мають бути закритими глухими нерухомими кожухами.

Всі верстати повинні бути оснащені екранами, що захищають робітників від стружки, що вилітає із зони обробки та бризок мастильно-охолоджуючої рідини.

Конструкція всіх пристроїв для закріплення обробляючих деталей та інструмента повинна забезпечувати закріплення інструмента, та виключати самовільне розкріплення його в процесі роботи.

Для створення високопродуктивних та безпечних умов праці верстатник робочі місця оснащуються допоміжним обладнанням (інструментальними шафами, полицями, тарою тощо) для зберігання

заготовок, готових виробів, інструментів, пристроїв. Наявність допоміжного обладнання, його раціональна будова та правильне розташування дозволяє не захащувати робочі місця, що сприяє збільшенню продуктивності праці та запобігає виникненню нещасних випадків.

Забороняється вимірювати деталі на працюючому верстаті, так як це пов'язано із небезпекою травмування робітників різальним інструментом, оброблюваною деталлю чи пристроєм. Для вимірювання розмірів деталей верстат необхідно зупинити.

При роботі на верстаті робітник повинен використовувати засоби індивідуального захисту: захисті окуляри, індивідуальні щитки та спецодяг, який потрібний для захисту від дії мастила, емульсії та інших рідин, що використовуються при обробці деталі. Захисні окуляри і індивідуальні щитки використовуються головним чином для захисту органів зору від механічної та теплової дії різних факторів виробничого середовища – поранення очей відлітаючими частинками оброблюваної деталі і інструмента (стружкою, абразивним пилом, різними металевими

Робітники, що мають стаж роботи дублером, допускаються до самостійної роботи на верстаті тільки після перевірки знань по будові верстата, пристроїв, інструменту, технологічного процесу і правил техніки безпеки.

На фрезерних та свердлувальних операціях пристрої для затиску деталі оснащені пневматичним приводом, тому при миттєвому відключенні стиснутого повітря можливе розкріплення деталі, що може стати причиною травматизму або нещасного випадку. Для запобігання цього необхідно передбачити запобіжні пристрої, які б мали змогу захистити робітника чи попередити його про небезпеку.

Захисні пристрої, що огороджують зону обробки, повинні захищати робітника від відлітаючої стружки та бризок змащувально-охолоджувальної рідини; кріплення захисних пристроїв повинно бути надійним і блокувати самовідкриття

При використанні мастильно-охолоджувальній рідини можливе її розбризкування. Це небезпечно для органів зору робітника, а також може спричиняти подразнення шкіри в оточуючих працівників. Також негативним явищем є виділення тепла в зоні обробки. Значне виділення тепла в зоні обробки при роботі на верстатах та відлітання розпечених частинок металу є небезпечним для органів зору, а при попаданні частинок металу на шкіру можливе отримання опіків, тому необхідно використовувати захисні окуляри, а також захисну одягу з цупкої тканини, яка повинна повністю закривати тіло.

Під час шліфувальних операцій в повітря може попасти металевий та абразивний пилю, можливе його попадання в організм людини через стравохід та дихальні шляхи; шкідливими можуть бути також гази, що утворилися в наслідок випаровування МОР при обробці деталі.

Санітарними нормами передбачені технологічні процеси і виробниче обладнання приймати такими, щоб були відсутніми або мінімальними виділення у повітря приміщень, в атмосферу та стічні води речовин із неприємним запахом, тепла, вологи і пилю. Для створення у приміщенні дільниці нормальних метеорологічних умов, видалення шкідливих газів та пилю необхідно належним чином спроектувати та експлуатувати вентиляційну систему, застосовувати природну, механічну та змішану вентиляції.

Шум на виробництві несприятливо впливає на працюючого: послаблює увагу, уповільнює швидкість психічних реакцій вносить дискомфорт в навколишнє середовище. Знижується продуктивність праці, шум затрудняє своєчасну реакцію працюючих на попереджувальні сигнали, які подаються персоналом, що обслуговує внутрішньоцеховий транспорт, це може стати причиною нещасного випадку.

Для зниження шуму, що виникає при роботі електродвигунів, насосів і вентиляторів, їх встановлюють на окремих фундаментах. Між агрегатом і фундаментом розміщують звукоізоляційні прокладки.

Для захисту від шуму при роботі на пресах, при обрубці литва використовують засоби індивідуального захисту: навушники, вкладиші.

Найбільш ефективним заходом по боротьбі з шумом є зниження його в джерелах утворення: в агрегатах, машинах, механізмах.

При плануванні дільниці об'єднують в одну групу верстати та інше обладнання за ступенем шумності

Майже все обладнання на дільниці має електричний привід, тому варто розглянути засоби по безпечній експлуатації електричних установок. До засобів захисту від пошкодження струмом відносяться забезпечення неможливості доступу до струмопровідних частин (ізоляція струмопровідних частин, розташування їх на недоступній висоті, огороження та ін.); електричне розподілення мережі - це розподілення електричної мережі на окремі електричні, не пов'язані між собою дільниці з допомогою спеціальних розподільчих трансформаторів; використання малого напруження (характерного для ручного інструменту); подвійна ізоляція - це електрична ізоляція, яка складається з робочої та додаткової ізоляції; захисне заземлення; захисне занулення; захисне відключення.

5.2 Розрахунок захисного заземлення

На дільниці механічного оброблення плити використовуються вертикально-фрезерні верстати з ЧПК, вертикально-свердлувальні верстати з ЧПК, горизонтально- та вертикально-фрезерні універсальні верстати, шліфувальні верстати.

При появі напруги на конструктивних частинах електрообладнання, при замкненні на корпусі виникає небезпека враження електричним струмом робітника, тому на кожному верстаті і застосовується захисне заземлення.

Виконуємо розрахунок заземлювального пристрою, виконаного у вигляді вертикальних електродів довжиною l , заглиблених у землю і з'єднаних між собою сталлюю штабою шириною B (рис. 6.1). Для вертикальних електродів використані сталі труби діаметром d .

Відстань від поверхні землі до верхнього краю вертикального електрода t_0 , відношення відстані L між вертикальними електродами до їхньої довжини l дорівнює K .

Вихідні дані:

питомий електричний ґрунту $\rho = 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $l = 3,0 \text{ м}$; $d = 0,050 \text{ м}$;

$t_0 = 0,6 \text{ м}$; $K = 2$; $B = 0,06 \text{ м}$; розміщення вертикальних електродів - в ряд.

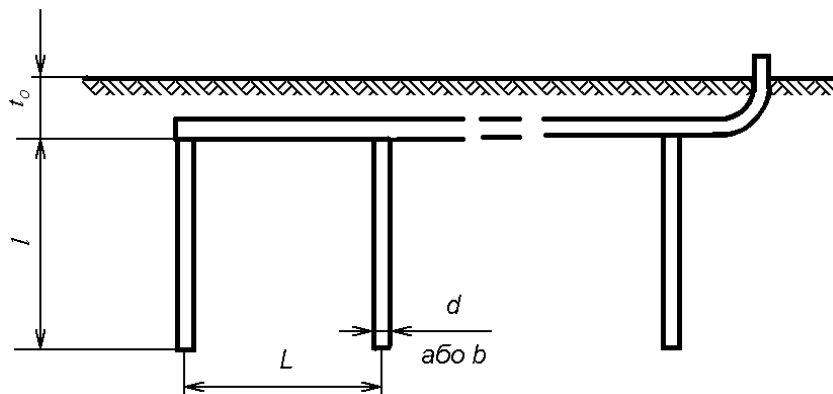


Рис. 5.1 - Схема заземлювального пристрою

1). Визначаємо відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювання

$$t = t_0 + l/2,$$

$$t = 0,6 + 3,0/2 = 2,1 \text{ м.}$$

2). Встановлюємо допустиме значення опору розтікання струму заземлювального пристрою $R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом}$.

3). Знаходимо опір розтікання струму одиночного вертикального заземлення, (для сталеві труби діаметром d , $d = 0,95b$):

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{d} \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l}{4t - l} \right]$$

де ρ - питомий електричний опір даного виду ґрунту, у нашому випадку для суглинку $\rho = 70$ Ом.

$$R_B = \frac{70}{2} \cdot \frac{1}{0,14} \cdot \frac{1}{0,050} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,1 + 3,0}{4 \cdot 2,1 - 3,0} = 21,01 \text{ Ом.}$$

4). Розраховуємо в першому наближенні необхідну кількість вертикальних електродів:

$$n_B = \frac{R_B}{R_{дон}},$$

$$n_B = \frac{21,1}{4} = 5,2,$$

приймаємо в першому наближенні 6 електродів.

5). Вибираємо коефіцієнт використання вертикального електрода з таблиці коефіцієнтів використання вертикальних електродів: $K_B = 0,8$.

6). Розраховуємо кількість вертикальних електродів з урахуванням коефіцієнту використання:

$$n_B = \frac{R_B}{R_{дон} \cdot K_B},$$

$$n_B = \frac{21,01}{4 \cdot 0,8} = 6,5 \text{ шт.}$$

Приймаємо $n_B = 6$ шт.

7). Розраховуємо відстань між електродами із співвідношення $K = \frac{L}{l}$,

$$L = K \cdot l = 3 \cdot 3,0 = 9,0 \text{ м}$$

8). Розраховуємо довжину горизонтальної штаби:

$$L_{шт} = 1,05 \cdot l \cdot n,$$

$$L_{шт} = 1,05 \cdot 9 \cdot 7 = 66,15 \text{ м.}$$

9). Розраховуємо опір розтікання струму горизонтальної штаби як одиночного горизонтального заземлювача (для полоси шириною $B = 0,03$ м):

$$*R_{III} = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \epsilon_n \frac{l^2}{B\epsilon},$$

$$t = t_0 + d/2 = 0,6 + 0,5 \cdot 0,06/2 = 0,615 \text{ м},$$

$$R_{III} = \frac{150}{2 \cdot 3,14 \cdot 66,15} \epsilon_n \frac{66,15^2}{0,03 \cdot 2,1} = 1,99 \text{ Ом}.$$

10). Визначаємо коефіцієнт використання горизонтальної штаби: $\kappa_{III} = 0,62$.

11). Визначаємо опір розтікання струму всього заземлювального пристрою:

$$R = \frac{R_B \epsilon R_{III}}{R_B \epsilon_{III} + R_{III} \epsilon \epsilon_B},$$

$$R = \frac{21,01 \cdot 1,99}{21,0 \cdot 0,62 + 1,99 \cdot 2,1} = 1,72 \text{ Ом}.$$

12). Перевіряємо виконання умови $3,2 \leq R \leq 4$ Ом, маємо $3,2 \geq 1,72$ Ом, отже оскільки опір розтікання струму нижче допустимого опору - необхідно зменшити кількість вертикальних електродів. Приймаємо

$$n_B = 4 \text{ шт.}$$

Проводимо перерахунок.

Вибираємо коефіцієнт використання вертикального електрода з таблиці коефіцієнтів використання вертикальних електродів [] табл. Д. 24: $\kappa_B = 0,77$.

Розраховуємо кількість вертикальних електродів з урахуванням

$$\text{коефіцієнту використання: } n_B = \frac{7}{0,77} = 9,09 \gg 9 \text{ шт.}$$

Розраховуємо відстань між електродами $L = K \cdot l = 2 \cdot 3,0 = 6,0$ м

Розраховуємо довжину горизонтальної штаби:

$$L_{III} = 1,05 \cdot 9 \cdot 4 = 37,8 \text{ м.}$$

Розраховуємо опір розтікання струму горизонтальної штаби як одиночного горизонтального заземлювача:

$$R_{III} = \frac{70}{2 \cdot 0,14 \cdot 0,7} \cdot \frac{37,8^2}{0,5 \cdot 0,06 \cdot 0,615} = 3,98 \text{ Ом.}$$

Визначимо коефіцієнт використання горизонтальної штаби: $k_{III} = 0,7$.

Визначимо опір розтікання струму всього заземлювального пристрою:

$$R = \frac{21,01 \cdot 0,98}{21,01 \cdot 0,7 + 3,98 \cdot 0,8} = 3,87 \text{ Ом.}$$

Висновок: Оскільки при кількості електродів 7 штук опір входить у допустимі межі ($3,2 \leq 3,43 \leq 4$ Ом), тобто заземлення забезпечено у нормі.

ВИСНОВКИ

Під час виконання магістерської роботи було розглянуто прототипи та розроблено конструкцію пеленгаційної антени та розроблено технологію виготовлення її тонкостінних елементів - плат ТЕМ-рупора.

Розроблено керуючу програму в САМ Esprit для фрезерного оброблення плати на верстаті з ЧПК HAAS VF-3.

Спроектовано верстатний пристрій для закріплення деталі на столі верстата при обробленні на фрезерувальному верстаті.

Виконано дослідження процесу фрезерування фольгованого склопластику та встановлено оптимальні режими різання та геометричні параметри різального інструменту - фрези.

1. передній кут $\gamma = 15^\circ$; задній кут $\alpha = 20^\circ$; кут підйому гвинтової канавки $\omega = 30^\circ$;
2. передній кут $\gamma = 10^\circ$; задній кут $\alpha = 20^\circ$; кут підйому гвинтової канавки $\omega = 30^\circ$.

Встановлено, що на температуру найбільший вплив має глибина фрезерування, а на зношування по задній поверхні - подача на зуб.

У розділі охорони праці наведені рекомендації по організації безпечних умов праці на виробництві.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zipline's Ambitious Medical Drone Delivery in Africa [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.technologyreview.com/2017/06/08/151339/blood-from-the-sky-ziplines-ambitious-medical-drone-delivery-in-africa/>
2. Drones will deliver defibrillators to 911 callers to help treat cardiac arrest [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.cnbc.com/2017/10/10/watch-flirtey-and-remsa-deliver-defibrillators-by-drone-to-911-callers.html>
3. TCI Model 641 VHF/UHF DF and Monitor Antenna Array. URL: http://www.ic72.com/pdf_file/6/513835.pdf (дата звернення: 15.11.2019).
4. Taflove A., Hagness S. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Norwood, MA: Artech House, 2005.
5. Jin J.M. The Finite Element Method in Electromagnetics. New York: John Wiley, 2002.
6. Wang S., Teixeira F.L. Some remarks on the stability of time-domain electromagnetic simulations. IEEE Trans. Antennas Propagat. 2004. Vol. 52. No. 3. P. 895–898.
7. Gibson P.J. The Vivaldi Aerial / P.J. Gibson // 9th European Microwave Conference Proceedings, 1979. – P. 101 – 105.
8. Kazici S. A Novel Class of Super-Elliptical Vivaldi Antennas with Enhanced Radiation Properties / Kazici S., Loutridis A., Caratelli D. // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2019. – P. 259 – 260.
9. Rohde & Schwarz [Електронний ресурс]. URL: <http://www.rohde-schwarz.com> (дата звернення: 29.02.2016).
10. Guo L. Design of a Compact Wideband Dual-Polarization Antipodal Vivaldi Antenna Array / Guo L., Qiang Y. // IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 2018. P. 1 – 3.

11. About SPX [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spx.com> (дата обращения: 24.02.2016).
12. Alaris Antennas [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alarisantennas.com> (дата обращения: 12.03.2016).
13. CRFS [Электронный ресурс]. URL: <https://uk.crfs.com> (дата обращения: 12.02.2016).
14. Гордеев А.И. Курсове та дипломне проектування з технології машинобудування та металорізальних верстатів: Навчальний посібник / А.И. Гордеев, Є.А. Урбанюк, А.Є. Безносів, В.Г. Мігаль. – Хмельницький: ХНУ, 2005. – 294 с.
15. Технологія машинобудування: методичні вказівки з курсового проектування для студентів напрямків підготовки “Інженерна механіка” та “Машинобудування” / В.Д. Каразей, Л.В.Присяжний, Ю.В. Савицький .- Хмельницький : ХНУ 2009.- 104с.
16. Бондаренко С.Г. Основи технології машинобудування : навч. посібник для студ. вищих техн. навч. закладів / С.Г. Бондаренко. – Львів : Магнолія, 2007. – 567 с.