МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Кафедра «Технологія машинобудування, верстати та інструменти»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____

В.О. Залога

«____» грудня 2018 р.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ РОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Магістерська кваліфікаційна робота

Спеціальність 131.00.04-02 – Технології машинобудування

Студент С. О. Чигрин

Керівник С. С. Некрасов

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях В. В. Фалько

Нормоконтроль О. В. Івченко

Суми – 2018

ЗМІСТ

ВСТУП 4

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ 7

1.1 Зміцнення композиційних матеріалів армуючими елементами 7

1.2 Вуглецеві, борні та карбідокремнієві волокна 7

1.3 Властивості вуглепластику при різних напружено-деформованих станах 11

1.4 Технологія формоутворення гвинтових поверхонь роз'ємного з'єднання деталей з АКМ механічною обробкою 16

1.5 Технологія алмазно-абразивної обробки гвинтових поверхонь виробів з армованих композитів 18

1.6 Технологія формоутворення гвинтових поверхонь точінням 23

1.7 Висновок 25

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ДЕФОРМАЦІЙ ДЕТАЛЕЙ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ОБРОБКИ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ 26

2.1 Характеристики міцності композитів 26

2.2 Висновок 33

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ДЕФОРМАЦІЙ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ 34

3.1 Методи дослідження напружено-деформованого стану з'єднань з армованих композиційних матеріалів 34

3.2 Математичне формулювання моделі напружено-деформованого стану різьбового з'єднання з круглою різьбою формоутвореного в АКМ. 35

3.3 Математичний опис моделі АКМ для визначення НДС з'єднання методом скінчено-елементного аналізу 39

3.4 Моделювання напружено-деформованого стану гвинтових поверхонь в деталях виготовлених з АКМ, методом скінчено-елементного аналізу 48

3.5 Висновок 53

РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ОБРОБКИ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ 54

4.1 Фактори, що впливають на обробку 54

4.2 Процес формоутворення гвинтової поверхні в АКМ 60

4.3 Висновок 64

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 66

5.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих факторів на механічній дільниці, розробка заходів по їх усуненню 66

5.2 Розрахунок заземлення ділянки верстатної зали 75

5.3 Висновок 79

Висновки 80

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ 81

Додаток А Елементи корпусу квадрокоптера 85

Додаток Б Графік функції залежності кроку та глибини профілю гвинтової поверхні 86

Додаток В Стаття 87

Додаток Г Акт впровадження науково – дослідної роботи 95

ВСТУП

Актуальність теми. Інтерес до використання з’єднань деталей з армованих композиційних матеріалів (далі – АКМ) в різних галузях промисловості, пов'язаний, з одного боку – з обмеженістю сировинних ресурсів для високоякісних сплавів, з другого – з набором унікальних властивостей АКМ, що дозволяє вирішити ряд технічних завдань, які недосяжні у металічному виконанні, підвищити службові характеристики машин і, з третього боку – з можливістю керувати властивостями матеріалу, з новими ступенями вільності при оптимізації матеріалу - конструкції, з пізнанням фундаментальних законів міцності і надійності штучних і біологічних композитів.

Конструкції з композиційних матеріалів використовуються у багатьох галузях виробництва: в аерокосмічній техніці (блоки і корпуси ракет), літакобудуванні (обшивки літальних апаратів), автомобільній галузі (стельові і бокові панелі кузовів), залізничному транспорті (елементи вагонів), виробництві газотурбінних двигунів (лопатки турбін), суднобудуванні (корпуси яхт і суден) тощо. Найчастіше елементи конструкцій являють собою багатошарову структуру, кожний шар якої спроектований відповідно до необхідних технологічних вимог. Як правило, конструювання будь-якого механізму потребує використання роз’ємних з’єднань його робочих органів, елементів корпусу тощо. Для цього необхідно шукати нові методи з’єднання деталей, адже армовані композиційні матеріали мають геть інші якості та властивості ніж метали, і способи з’єднання останніх в даному випадку не актуальні. Саме тому технологія обробки гвинтових поверхонь роз’ємних з'єднань в деталях з АКМ на сьогоднішній день є однією з найперспективніших направлень в сучасній інженерії.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема роботи пов'язана з науковим напрямом досліджень кафедри «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» Сумського державного

університету щодо підвищення ефективності процесів механічної обробки деталей з армованих композиційних матеріалів та способів їх з'єднання.

Мета та задачі дослідження. З метою підвищення ефективності з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів досліджено способи формоутворення гвинтових поверхонь в даних матеріалах.

Для розв'язання даної мети було сформульовано ряд задач:

а) проаналізувати існуючі технології обробки гвинтових поверхонь в деталях з армованих композиційних матеріалів і розглянути можливі варіанти для їх модернізації;

б) визначити методологію розрахунку впливу механічної обробки гвинтових поверхонь в армованих композиційних матеріалах на деформації які при цьому в них виникають;

в) дослідити способи розрахунку деформацій гвинтових поверхонь в деталях з армованих композиційних матеріалів за допомогою математичної моделі;

г) розробити рекомендації для поліпшення ефективності обробки та підвищення якості гвинтових поверхонь в деталях з армованих композиційних матеріалів.

Об'єкт дослідження – технологія формоутворення гвинтових поверхонь в деталях виготовлених з армованих композиційних матеріалів.

Предмет дослідження – оптимізація обробки гвинтових поверхонь в армованих композиційних матеріалах для розширення способів з'єднання деталей виготовлених із композиту.

Методи дослідження. Результати роботи отримані на основі теоретичних і експериментальних досліджень. Дослідження напружено-деформованого стану з'єднань деталей з використанням гвинтових поверхонь в армованих композиційних матеріалах в програмному комплексі LS-DYNA. Твердотільна модель з'єднання деталей виконана в графічному редакторі SOLIDWORKS.

Наукова новизна. Розроблені рекомендації щодо підвищення якості обробки гвинтових поверхонь в деталях з армованих композиційних матеріалів;

виведені нюанси щодо специфіки методів вибору матеріалу ріжучого інструменту, його геометрії та способів заточки.

Практичне значення отриманих результатів дозволяє удосконалити рівень міцності з'єднань деталей з армованих композиційних матеріалів з деталями виготовленими з інших матеріалів.

Апробація роботи. Результати науково-дослідної роботи впроваджені в виробництво ТОВ НВП «Насостехкомплект».

Публікації. За результатами роботи опубліковано одну статтю в журналі, що входить до переліку фахових журналів затверджених МОН України/ (Некрасов, С. С. Спосіб обробки круглої зовнішньої різьби з великим кроком / С. С. Некрасов, А. Ю. Довгополов, С. О. Чигрин, І. В. Калюжний // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 2(82). – С. 8.).

Особистий вклад автора. Автором виявлені і проаналізовані чинники, що впливають на процес формоутворення гвинтових поверхонь в деталях з армованих композиційних матеріалів. Розроблені рекомендації щодо підбору ефективних режимів різання та способів заточки інструменту для забезпечення точності та якості оброблених поверхонь в деталях виготовлених з армованих композиційних матеріалів.

Структура та об’єм роботи. Робота складається зі вступу, 5-ти розділів, загальних висновків, списку використаних посилань із 46 джерел, 95 сторінок тексту, 28 рисунків і 10 таблиць; 4 додатки.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Зміцнення композиційних матеріалів армуючими елементами

Процес зміцнення АКМ базується на положеннях теорії анізотропних середовищ, теорії пружності та опору матеріалів. Композиційні армовані матеріали можна класифікувати за такими ознаками: матеріал компонентів; вид армуючих елементів та їх орієнтація; спосіб отримання композиту і виробів з нього; за призначенням [1]. Залежно від матеріалу матриці всі АКМ можна розбити на три групи: композиції з металевою матрицею – металеві композиційні матеріали (МКМ), з полімерною матрицею – полімерні композиційні матеріали (ПКМ) і з керамічною матрицею – керамічні композиційні матеріали (ККМ). Полімерні КМ в більшості випадків називають за матеріалом армуючих волокон. ПКМ, армовані скляними волокнами, називаються склопластиками (одні з найпоширеніших), металевими – металопластиками, органічними – органопластиками, борними – боропластиками, вуглецевими – вуглепластиками (мають широку область застосування), азбестовими – азбопластиками і т. п.

За орієнтацією та типом армуючих елементів (конструкційний принцип) всі КМ можна розбити на дві групи: ізотропні і анізотропні. Ізотропними називають матеріали, що мають однакові властивості в усіх напрямках. Анізотропними називають матеріали, властивості яких залежать від напряму. До таких КМ відносять матеріали, волокна яких орієнтовані в певних напрямах – однонаправлені, шаруваті і тривимірноармовані.

1.2 Вуглецеві, борні та карбідокремнієві волокна

Вуглецеві волокна відносять до класу найбільш перспективних армуючи елементів у зв'язку з низькою густиною (1430–1830 кг/м³), високою міцністю (3,5 кН/мм^2) і модулем пружності (250– 400 кН/мм^2).

До недавнього часу вуглецеві волокна і тканини із них застосовувалися для виготовлення теплозахисних матеріалів. Однак вдосконалена технологія отримання тонких волокон, що поєднують високу міцність і жорсткість з іншими спеціальними властивостями (термостійкість, електропровідність тощо) дозволила створити армовані вугільними волокнами метали та пластики, що відрізняються малою щільністю та високою міцністю. Такі композиції все більше застосовуються в космічній, ракетній й авіаційній техніці.

Сировиною для отримання вуглецевих волокон служать органічні волокна, які використовуються в текстильній промисловості. Найчастіше застосовують віскозу (целюлозне штучне волокно) і поліакрилонітрил (полівінілове синтетичне волокно), які отримують видавлюванням через фільєри відповідного полімеру у в'язкотекучому стані. Крім того, вуглецеві волокна отримують зі смол і пеків (важкий залишковий продукт перегонки кам'яновугільної смоли). Структура вихідних волокон - лінійно- кристалічні утворення (фібрили), орієнтовані по осі волокна. Діаметр фібрил у віскози становить $(300\text{-}500)\cdot10^{10}$ м у поліакрилнітрилу (ПАН) – $(73\text{-}150)\cdot10^{-10}$м. Процес виготовлення вуглецевого волокна полягає в послідовному нагріванні вихідного полімерного волокна до температур більших, ніж температура деструкції полімеру.

Термічна обробка проходить в три етапи. Перший етап – нагрівання вихідної сировини до температур 200–300 °С. При цьому виникають поперечні зв'язки між макромолекулами і волокна окислюються. Другий етап термообробки проводиться при 1000–1500 °С. Тут волокно вже на 80–95% складається з елементарного вуглецю, який ще зберігає надмолекулярну організацію вихідних полімерних волокон. Після третього етапу термообробки (при 1500–3000 °С) отримують волокна, що на 98–99 % складаються з вуглецю, який закристалізувався в систему, близьку до графіту.

Залежно від вмісту вуглецю вуглецеві волокна ділять на три групи: 1) карбонізовані (не більше 90 % С); 2) вугільні (91–98 % С); 3) графітові (більше 98% С). Технологія отримання вуглецевих волокон із віскози складається з нагрівання до 150 °С (для видалення води), підвищення

температури зі 150 °С до 240 °С (видалення груп ОН та створення зв'язків С=О, С=С), подальше нагрівання до 400 °С (розщеплення целюлозного кільця) та від 400 до 700 °С (створення графітоподібних кілець). Останнє нагрівання проводять з натягом ниток для створення кращої орієнтації кристалітів. Графітизувальну обробку волокон з віскози проводять при 2000 °С.

Процес термообробки поліакрилнітрильного волокна проходить дещо інакше (рис. 1.1). Спочатку вихідне волокно нагрівають до 220 °С і витримують при цій температурі 20 годин, потім температуру піднімають до 980 °С в атмосфері водню і витримують 24 години. При цьому границя міцності волокна досягає 1,8 кН/м^2 , а модуль пружності – 14 кН/м^2 . На наступному етапі, коли волокно витримують протягом 2 годин при 2480–2500°С, до ниток прикладають натяг 0,35 кН/м^2 протягом 15 хвилин. Границя міцності волокна після такої обробки зростає до 3,5 кН/м^2 , а модуль пружності – до 350 кН/м^2 . Кінцева операція термообробки ПАН-волокон – графітизація при 2700 °С протягом 15 хвилин. Модуль пружності графітизованого волокна доходить до 420 кН/м^2 .

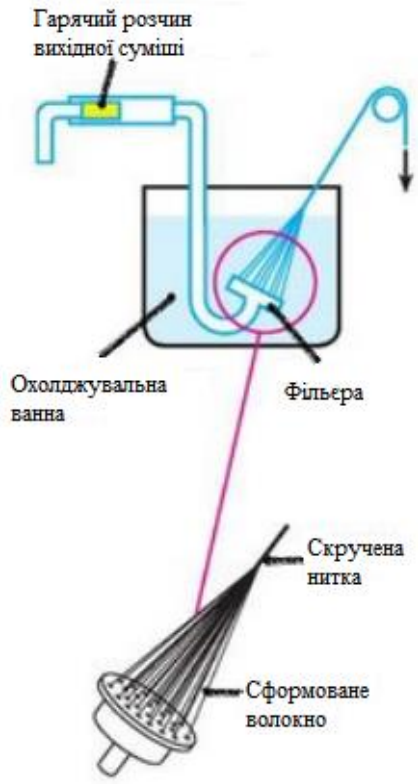


Рисунок 1.1 – Процес формування волокна

Міцність і жорсткість вуглецевих волокон пояснюється специфічною будовою кристалів графіту. У його структурі базисні площини, утворені атомами вуглецю, регулярно розташовані одна над одною на відстанях в 2,5 рази більших, ніж атоми в площині.

Таким чином, високі міцність і жорсткість у базисних площинах поєднуються з низькою міцністю у напрямках, перпендикулярних до цих площин. Жорстке вуглецеве волокно отримують, якщо технологічний процес побудований так, що максимальна кількість базисних шарів розташовується паралельно осі волокна. Щоб підвищити міцність вуглецевих волокон, слід зменшити розмір кристалітів, що мають більш досконалу будову.

Як технологічні прийоми, що додають вуглецевим волокнам додаткову жорсткість і міцність, використовують легування бором за допомогою дифузії з газової фази, опромінення волокон нейтронами в атомному реакторі, введення перед піролізом бури чи золю кремнієвої кислоти, а також витягування в процесі окислення і при температурі графітизації. Якщо в тонких волокнах є макродефекти, що викликають локальні концентрації напружень, то міцність вуглецевих волокон зменшується. Дефектність волокон обумовлює лінійну залежність їх міцності від довжини: зі збільшенням довжини значно знижується міцність і дещо збільшується модуль Юнга.

До недоліків вуглецевих волокон можна віднести їх схильність до окислення на повітрі, хімічну активність при взаємодії з металевими матрицями, відносно слабку адгезію до полімерних матеріалів. В даний час зусилля дослідників зосереджені на подоланні цих недоліків. Вивчаються методи попереднього окислення, травлення в різних реактивах, збільшення зсувної міцності за рахунок покриттів волокон вусами, розташованими перпендикулярно до осі волокна («віскерізація»). Щоб покращити сумісність волокон з металевими матрицями і захистити їх від окислення, на вуглецеві волокна наносять металеві та керамічні покриття (тугоплавкі метали, карбіди, нітриди, бориди та ін.).

1.3 Властивості вуглепластику при різних напружено-деформованих станах

Використання нових матеріалів розкриває нові можливості для виготовлення, машин та механізмів з високим ККД, зниженим енергоспоживанням та малою масою. Останнім часом, вуглепластик, почали широко використовувати для виготовлення корпусних деталей машин. Це матеріал, який має високу граничну міцність (1000 - 2600 МПа) та низький коефіцієнт тертя (в парі, «вуглепластик-сталь 45» значення коливається в межах від 0,1 до 0,17 в залежності від дослідних умов), за рахунок використання в своєму складі, вуглецевих волокон.

Для проектування будь якого виробу основне це, наявність достовірної інформації про механічні властивості матеріалу. Разом з тим, властивості вуглепластику залежать від багатьох факторів, основні це характер армування, технологія виготовлення, та подальша термічна обробка.

Переваги та високі механічні характеристики вуглепластику (та інших композиційних матеріалів) найбільш істотно реалізуються в орієнтованих матеріалах, армованих паралельними волокнами, тобто в так званих односпрямованих шарах, шляхом укладання таких шарів у різних

напрямках (рис.1.2).

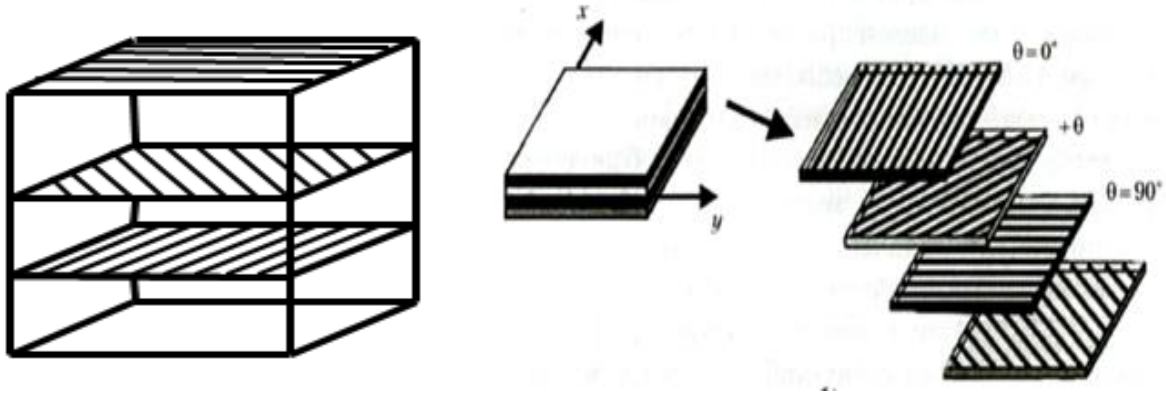


Рисунок 1.2 – Багатошаровий склопластиковий матеріал
з односпрямованих шарів [2]

Волокна сприймають основну частку навантаження у вуглепластику гранична міцність та питома жорсткість даних армуючих елементів, значно вища за деякі метали. Порівняння властивостей деяких композиційних матеріалів з металами представленні в таблиці 1.1.

Міцність вуглепластику залежить від багатьох факторів, одним із яких є напрямок прикладеної сили, відносно волокон, тому його застосування при тривимірному навантаженні характеризується низькою міцністю при нормальних навантаженнях. Залежність міцності вуглепластику від напрямку прикладання сили представлена на рисунку 1.3.

Згідно графіку представленого на рисунку 1.3, вуглепластик, краще за металеві сплави, витримує поздовжні навантаження, а за поперечними навантаженнями – істотно їм поступається. Саме тому раціонально застосовувати його при роботі на розтяг або стискання вздовж волокон. Найбільш перспективними, для отримання компонентів роз'ємних з'єднань, на сьогодні вважаються композиційні матеріали армовані вуглецевими волокнами – вуглепластики.

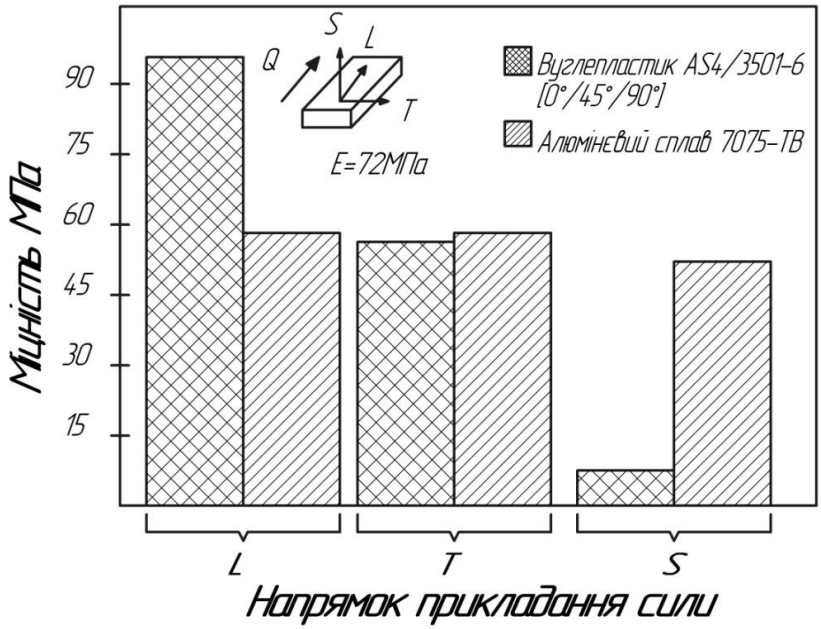


Рисунок 1.3 – Залежність міцності вуглепластику від напрямку прикладання сили [3].

Таблиця 1.1 – Порівняння властивостей композиційних матеріалів з конструкційними матеріалами [4].

Параметри	**Скло-пластик**	**Вугле-пластик**	**Алюміній 7050-Т7451**	**Сталь РН138М0**
Густина·10^{-3}, кг/м^3	2,1	1,5	2,82	7,76
Межа міцності, МПа				
при розтяганні вздовж волокон	1250	1130	485	1385
при розтяганні перпендикулярно волокнам	35	42	-	-
при стисканні вздовж волокон	600	1130	-	-
при стисканні вздовж волокон	600	1130	-	-
при зсуві	68	63	-	-
Питома міцність при розтяганні вздовж волокон·10^{-3}, м.	83	73	172	178
Модуль пружності, ГПа:				
вздовж волокон	45	137	72	205
перпендикулярно волокнам	12	7	-	-
Модуль зсуву, ГПа	4,5	4,2	27	80
Питома жорсткість·10^{-6} , м	22	88	25,5	26,4

Армовані композиційні матеріали досить дорогі, дуже складні в ремонті та в з’єднанні між собою, але незважаючи на всі ці ознаки, їх досить активно

впроваджують у військову техніку, машинобудування, спорт і медицину. Задача отримання якісного та працездатного роз'ємного різьбового з'єднання в АКМ є актуальною задачею.

Механічна обробка композиційних матеріалів значно відрізняється від обробки металів. Крім того, композиційні матеріали також різняться між собою

за своїми властивостями і повинні оброблятися з урахуванням індивідуальних особливостей. Відмінності властивостей, що впливають на оброблюваність, всередині групи композитів набагато більш значні, ніж, наприклад, між металами. Це, в свою чергу, створює певні труднощі як перед тими, хто хоче виконати обробку композиційного матеріалу. Найчастіше початок виготовлення виробів з цих матеріалів вимагає повного переосмислення методів обробки, переліку використовуваного інструменту, способу закріплення заготовки, а, в деяких випадках, навіть застосування спеціалізованого обладнання і оснастки [5].

В процесі механічної обробки різанням АКМ ріжуча кромка викликає відшаровування волокон. Саме тому, ріжуча кромка при різані АКМ повинна бути максимально гострою, щоб запобігти виникненню тертя між інструментом та заготовкою.

Для якісної та довготривалої обробки армованих композиційних матеріалів, ймовірність зношення інструменту повинна бути мінімальною, оскільки будь-які зміни геометричної форми ріжучої кромки приведуть до миттєвого зростання температур в зоні різання і критичного зносу кромки. Геометрію інструменту потрібно підбирати так щоб забезпечити легке ненавантажене різання з виникненням мінімальних сил різання.

Геометричні параметри різального інструменту що рекомендуються для обробки армованих композиційних матеріалів, мають наступні межі варіювання: передній кут: γ=20-30°, задній кут: α=10-15°, кут загострення: β = 50-60°.

Обробка різанням армованого склопластикового матеріалу має ряд особливостей, що відрізняють їх від аналогічної обробки металів. Ці особливості зводяться до наступного:

а) Яскраво виражена анізотропія властивостей. Це визначає відмінність процесу різання при обробці вздовж і поперек армуючих волокон. Схема армування істотно впливає на якість і продуктивність обробки. Тому при розробці технологічної операції механічної обробки композиційних матеріалів слід враховувати також напрям обробки відносно напряму армування.

б) Складність отримання високої якості поверхневого шару. Шарувата структура призводить до того, що при зношуванні інструментів відбувається розшарування матеріалу. Крім того, при перерізані армуючих волокон, особливо при перехресному армуванні, спостерігається розкуйовджування перерізаних волокон, що призводить до погіршення якості поверхневого шару, тому іноді застосовують додаткову обробну операцію, наприклад зачистку.

в) Низька теплопровідність матеріалів, що обумовлює погане відведення теплоти із зони різання із стружкою і в оброблюваний виріб. Тому при обробці високоміцних композиційних матеріалів основна доля теплоти відводиться через різальний інструмент. Згідно з експериментальними даними тепловий баланс при обробці полімерних матеріалів наступний: в інструмент – 90 %, в стружку – 5 %, в оброблювану деталь – 5 %, тоді як при обробці металів іноді до 90 % теплоти відноситься стружкою і тільки 10 % поглинається деталлю і інструментом.

г) Інтенсивна дія скловолокна, що має високу твердість і абразивну здатність.

д) Високі пружні властивості. Сили різання при обробці композитів в 10 - 20 разів нижче, ніж при обробці металів, а пружні характеристики вищі, тому точність обробки в меншій мірі визначається пружними деформаціями системи : верстат - пристосування - інструмент.

е) Неможливість застосування мастильно-охолоджувальної рідини. Це обумовлюється тим, що більшість склопластиків досить сильно поглинають вологу. Тому застосування МОР у багатьох випадках спричиняє за собою введення додаткової операції – сушки виробу – або взагалі неприпустимо через безповоротну зміну фізико-механічних властивостей матеріалу.

ж) Специфічні вимоги техніки безпеки при різанні композиційного матеріалу.

Це пов'язано з виділенням найдрібніших часток матеріалу при різанні. Стан поверхневого шару відіграє дуже важливу роль в забезпеченні високих експлуатаційних показників виробів. Він має істотний вплив на міцність, знос, діелектричні показники, водо поглинання та ін..

Механічна обробка істотно змінює властивості поверхневого шару (а саме, шорсткість поверхневого шару). А розріз армуючих волокон призводить до зниження міцності виробів на 20 %. Шорсткість поверхні впливає як на водо поглинання на показники міцності, так і на зносостійкість.

Механічна обробка виробів з композиційних матеріалів інтенсифікує процес водо поглинання. Це відбувається за рахунок того, що при обробці, по-перше, знімається завжди наявний на поверхні шар полімеризованої матриці, що є як би захисним шаром; по-друге, перерізуються армуючі волокна наповнювача; при цьому утворюються мікротріщини та інші дефекти матеріалу, що порушують його міцність [6]. Згідно представленого вище, механічна обробка армованих композиційних матеріалів, досить складний та високотехнологічний процес що потребує значних матеріальних на наукових затрат.

1.4 Технологія формоутворення гвинтових поверхонь роз’ємного з’єднання деталей з АКМ механічною обробкою

Показники міцності гвинтового з’єднання даного типу повинні бути максимально високими, наближатися до показників аналогічного з’єднання виконаного в металі. Що стосується самої конфігурації гвинтового з’єднання в АКМ то тут повинно бути наступне, оскільки армовані композиційні матеріали не досить добре витримують навантаження на розтяг та стискання, порівняно з деякими металами, а на зсув взагалі погано себе зарекомендували [7], то потрібна зовсім інша геометрія профілю роз’ємного з’єднання, щоб уникнути поганих показників міцності, та не допустити виникнення гострих концентраторів напруг в роз’ємному з’єднанні.

Саме щоб уникнути негативних факторів представлених вище, і показана наступна концепція гвинтового з’єднання для армованих композиційних матеріалів. Запропоновано використати круглу різьбу – так як вона краще з усіх типів різьб працює на зріз, характеризується досить великою стійкістю, та підвищеним опором динамічним навантаженням, за рахунок відсутності гострих концентраторів напруг[8]. Основні параметри гвинтової поверхні такі як крок різі p та глибина профілю різі t а також зовнішній D та внутрішній D_1 діаметри різьби представлені на рисунку 1.4.

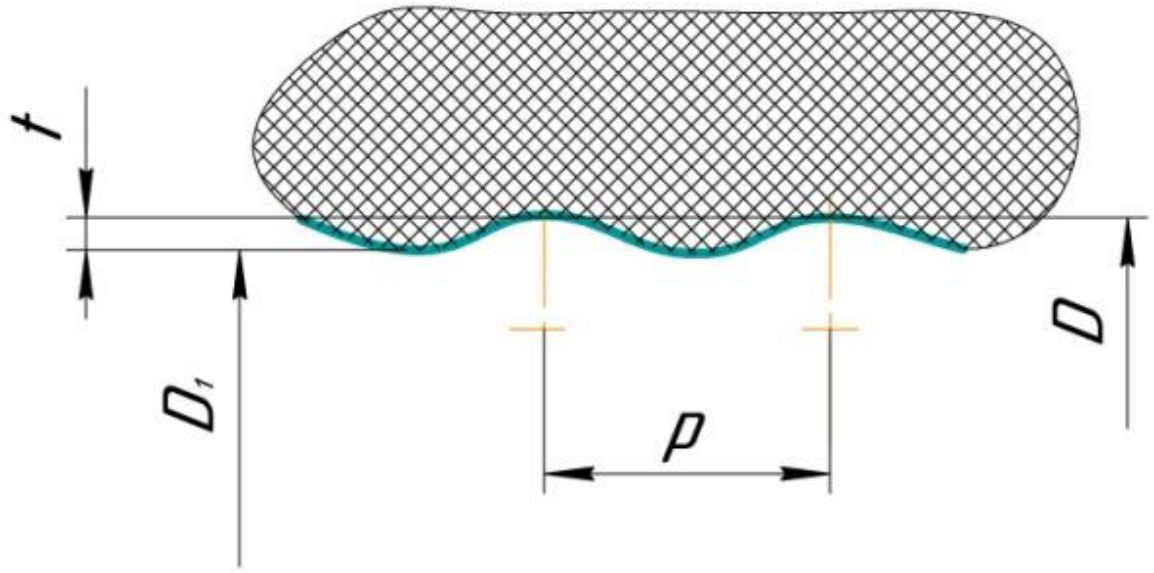


Рисунок 1.4 – Параметри гвинтової поверхні

Існують наступні способи отримання гвинтових поверхонь в деталях із склопластику: формоутворення різанням, пресуванням, заливкою компаунда, формуванням профілю, отримання профілю при відцентровому формуванні та ін. Формоутворення гвинтової поверхні в склопластиковому матеріалі є досить не простою задачею, зробити це можна якщо товщина формованої конструкції є достатньо великою і використовується гвинт з великим кроком різьби. Для склопластиків утворення гвинтової поверхні різцем, є переважаючим способом формоутворення різьбової поверхні, що забезпечує необхідну точність різьби.

Проте міцність з'єднання, яка залежить як від фізико-механічних властивостей матеріалів деталей, що з’єднуються, так і від методу отримання

гвинтових поверхонь, буде нижчою при формоутворенні різанням, через руйнування армуючих шарів склопластикового матеріалу та порушення цілісності його армованої структури в районі утворення гвинтової поверхні. Метод отримання гвинтових поверхонь різцем знаходить широке застосування але для армованого склопластикового матеріалу має свої особливості [9].

1.5 Технологія алмазно-абразивної обробки гвинтових поверхонь виробів з армованих композитів

Механізм формування поверхневого шару при алмазно-абразивній обробці армованих композиційних матеріалів полягає в тому, що поверхневий шар матеріалу під дією механічних напружень, теплоти і окислювальних процесів деструктується і механодиспергується, його глибина залежить від швидкості різання і подачі та змінюється від 20 до 200 мкм.

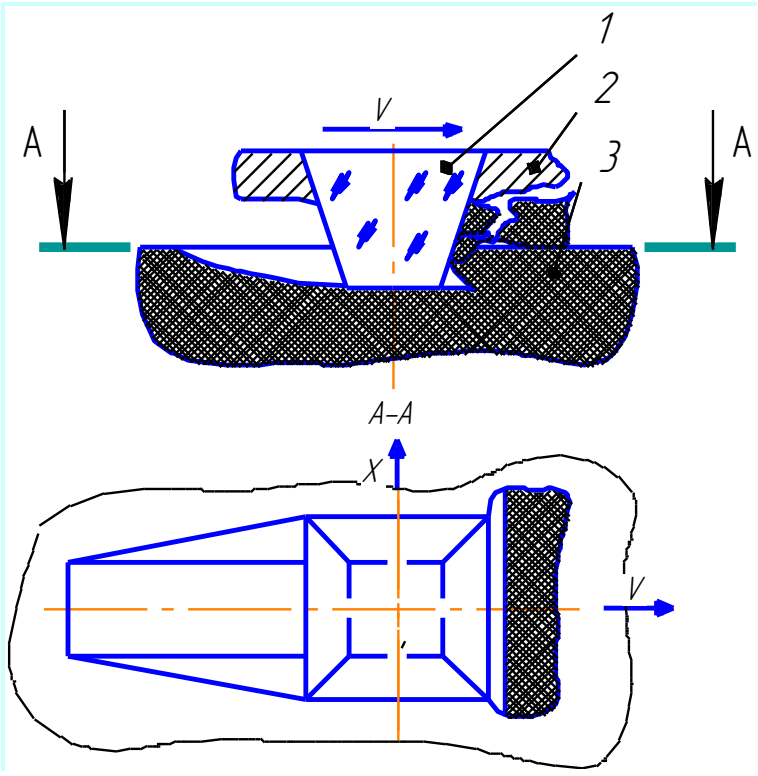


Рисунок 1.5 – Механіка контактної взаємодії алмазного зерна з оброблюваним матеріалом:1 – алмазне зерно;2 – зв’язка; 3 – оброблюваний матеріал.

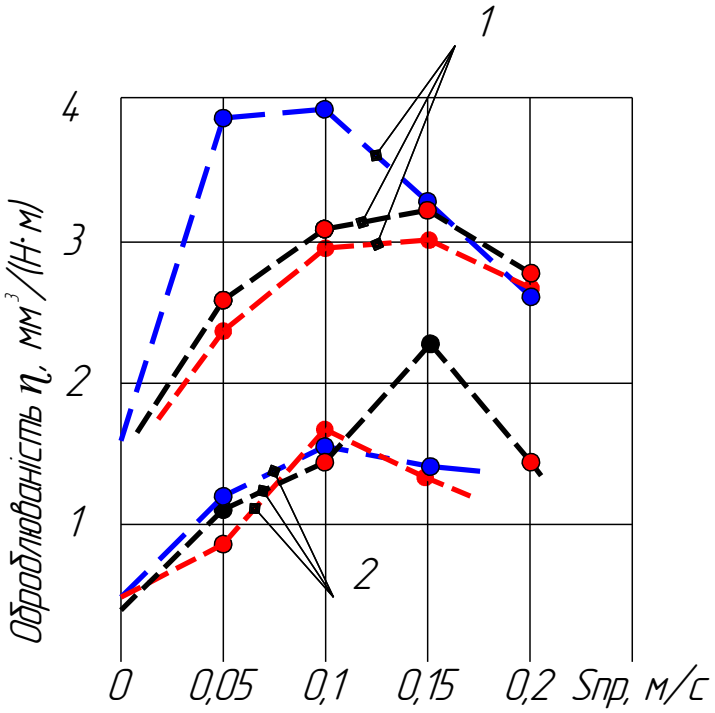


Рисунок 1.6 – Вплив подачі на оброблюваність полімерних композиційних матеріалів: 1 – вуглепластик; 2 – органопластик [9]

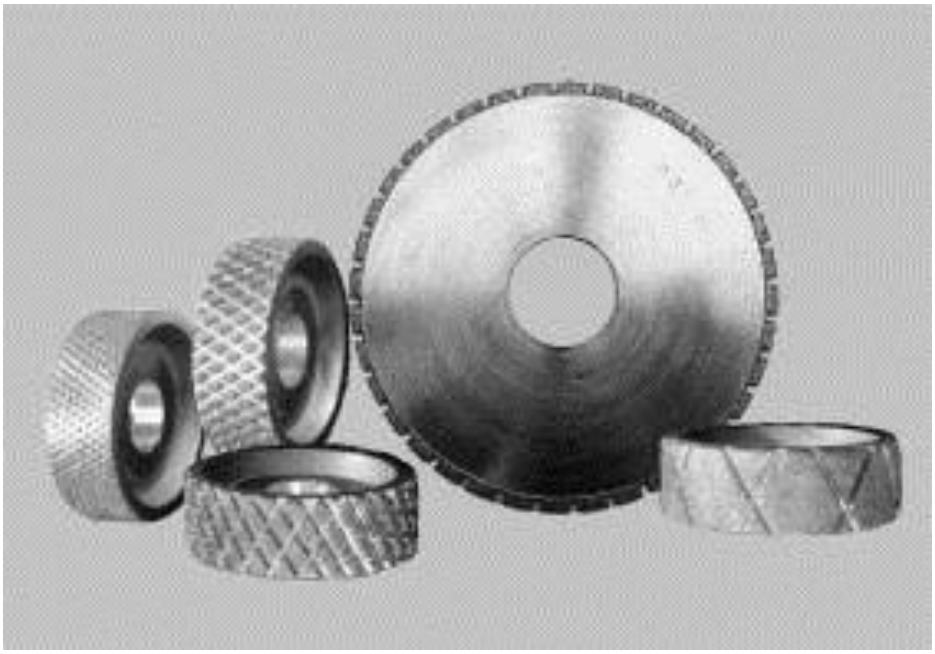


Рисунок 1.7 – Приклад алмазно-абразивного інструменту для обробки полімерних композиційних матеріалів

Застосування алмазно-абразивного інструменту доцільно у таких випадках:

– при обробці зовнішніх поверхонь оболонок, коли слід зняти невелику товщину, головним чином, полімеризованого сполучника, забезпечивши високу якість оброблюваної поверхні;

– при виготовленні зразків для дослідження фізико-механічних характеристик;

– при розрізанні виробів з композитів і нарізанні різьб.

Шліфування як метод обробки виробів із композитів найбільш доцільно застосовувати в двох випадках.

По-перше, при зовнішній обробці кругле поздовжнє шліфування, коли необхідно забезпечити високу якість поверхні при відсутності відколів, розшарувань, розкуйовування та інших дефектів. Обробка за своїм характером чистова, з глибинами різання до 1 мм. Як правило, в цьому випадку знімається верхній шар полімеризованого сполучника з мінімальним пошкодженням армувальних волокон.

По-друге, при виготовленні зразків для дослідження фізико-механічних характеристик матеріалу в даному випадку застосовується схема плоского шліфування периферією круга. Товщина шару, що знімається, невелика і не перевищує 0,5–1,0 мм. Вимоги до якості обробленої поверхні високі й аналогічні першому випадку.

У той же час, обробка шліфуванням має ряд позитивних якостей, особливо в тих випадках, коли при знятті невеликого припуску (не більше 1мм) слід отримати досить високу якість поверхні. При обробці композитів поверхня, оброблена шліфуванням, має менший дефектний шар і малу висоту мікронерівностей. Тому вироби, оброблені шліфуванням, забезпечують більш надійну та довговічну роботу конструкцій, ніж аналогічні, оброблені лезовим інструментом. При визначенні фізико-механічних характеристик виробів з композитів за допомогою зразків, отриманих шліфуванням, їх величини більш близькі до дійсних, ніж у зразків, отриманих за допомогою лезових інструментів, наприклад, фрезеруванням.

Як відомо, продуктивність шліфування, якість шліфованих поверхонь, витрата абразивного чи алмазного інструменту визначаються, головним чином, стійкістю круга, тобто періодом часу між його двома правками. Вона є основною експлуатаційною властивістю, що характеризує шліфувальний круг.

Під стійкістю шліфувального круга розуміють його здатність протистояти процесам затуплення його ріжучих зерен, налипання матеріалу на робочу поверхню та процесом зміни його геометричної форми. Робоча поверхня круга характеризується макро- і мікрогеометрією. Під макрогеометрією розуміють правильність його геометричної форми, а під мікрогеометрією – розмір абразивних зерен, їх форму, кути і радіуси заокруглення вершин і т. д.

При обробці композитів відбуваються зміни макро- і мікрогеометрії, причому характерним для шліфування цих матеріалів є змішане зношування круга, яке полягає у відколюванні від зерен невеликих частинок, випаданні цілих зерен через інтенсивно стирання сполучника, затуплення зерен при інтенсивному забиванні пор стружкою та продуктами деструктуризованого полімеру.

Продуктивність шліфування, якість поверхневого шару, стійкість круга, сили різання і температура в зоні різання залежать від зернистості круга, виду сполучника, ширини круга, концентрації (для алмазних і ельборових кругів), властивостей оброблюваного матеріалу й режимів різання. Найважливішим фактором при призначенні характеристик шліфувального круга і режимів обробки є стійкість. Зношування шліфувального круга може відбуватися як за рахунок його засалювання, головним чином, продуктами деструктуризованого полімеру, так і за рахунок зміни геометричної форми круга, що впливає на точність і якість поверхні. Крім того, в процесі обробки відбувається затуплення зерен, відрив їх окремих частинок через наявні дефекти типу мікротріщин, а також виривання окремих зерен внаслідок інтенсивного стирання сполучника круга.

Встановлено, що для шліфування виробів із склопластиків найчастіше застосовуються круги з ельбору з частотою обертання 2500– 3000 об/хв. Найбільш складним є шліфування органопластику. Його застосовують,

головним чином, для виготовлення зразків для проведення випробувань з визначення фізико-механічних характеристик. У процесі шліфування відбувається інтенсивне засалювання круга і, як наслідок, отримання поверхні невисокої якості, з ворсинками і припалами. Тому потрібно часто правити круг. Процес ускладнюється й тим, що в більшості випадків застосування охолоджувальної рідини неприпустимо.

Таким чином, нарізання різьби на виробах із композиційних матеріалів

доцільно проводити кругами із синтетичних алмазів АС6 або АС15 зернистістю 200/160, концентрацією 50–100% на сполучнику М1. Переваги цього методу нарізання:

- зменшення основного і допоміжного часу за рахунок
- зменшення числа проходів і часу на переточування інструментів;
- відсутність дефектів обробки в виді сколів і розкуйовджень;
- висока стійкість алмазного круга;
- повне усунення операції зачищення різьби;
- можливість практично повного видалення мілко дисперсної стружки шляхом установлення в вузькій зоні її видалення ефективної витяжної вентиляції, що зменшує запиленість робочих приміщень і покращує умови праці.

Можливе формоутворення різьби за методом швидкісного шліфування, у відповідності з яким використовують диски (круги), виготовлені з міді, алюмінію та інших матеріалів, більш м’яких, ніж матеріал оброблюваної деталі. На периферії такого диска роблять, наприклад, за допомогою накатки, багато

рівномірно розміщених мілких радіальних виступів у вигляді пірамід, суцільних ребер чи інших формоутворень. Обробку такими дисками ведуть з надзвичайно великою коловою швидкістю (частота обертання диска до 30 000 об/хв).

При такій швидкості матеріал диска з низькою власною твердістю забезпечує зносостійкість, достатню для обробки твердих матеріалів.

Швидкість має бути тим більшою, чим вища твердість оброблюваного матеріалу і чим нижча твердість матеріалу диска. Площа контакту виступу диска із заготовкою дуже мала, тому концентрація кінетичної енергії, що забезпечує динамічне навантаження, дуже велика. Виступ диска, ударяючи по заготовці, не знімає з неї стружку як при звичайному різанні, а вибиває найдрібніші частинки, створюючи мілкодисперсний порошок.

Час контакту виступів диска з деталлю настільки малий, що кількість утворюваної теплоти незначна, і диск істотно не нагрівається, тому обробку можна вести без охолоджування. Деталь схильна до теплових деформацій і розтріскування менше, ніж зазвичай, що веде до підвищення точності обробки. Зношений диск може бути легко відновлений за допомогою накатки.

1.6 Технологія формоутворення гвинтових поверхонь точінням

Утворення стужки при точінні в значній мірі визначає процес різання і його результати. Від процесу стружкоутворення залежать сила різання, витрата енергії, кількість теплоти, що виділяється, точність і якість обробки, умови роботи інструменту і верстата. Характер утворення стружки і її типи багато в чому визначаються властивостями оброблюваного матеріалу. Характерна особливість процесу різання в тому, що стружка утворюється в процесі подолання пружних деформацій (для склопластику в цьому випадку область пластичних деформацій практично відсутня).

Оброблюваний матеріал стискається під час різання, потім повертається початкову форму. При подальшому збільшенні навантаження спочатку відбувається крихке руйнування полімерної матриці з утворенням тріщин. З'являється зона зсуву, що умовно є площиною сколювання. Одночасно відбувається як порушення адгезійних зв'язків між волокнами армуючого матеріалу і полімерною матрицею, так і руйнування (розрив) волокон. Утворюється елемент стружки, який переміщається уздовж площини зсуву, чому сприяє безперервна робота інструменту.

У процесі зсуву елемента стружки відбувається подальше стиснення матеріалу і утворення нового елемента стружки, який відокремлюється в той

момент, коли сила, що діє на різець, перевищить сили внутрішнього зчеплення. Якщо адгезійний зв'язок між волокнистим матеріалом і полімерною матрицею великий, то виходить зливна стружка. При недостатній адгезії утворюється елементна стружка або стружка надлому. Збільшення ступеня зносу інструменту призводить до сильного подрібнення стружки, появи великої кількості пилоподібних частинок.

Схема армування також впливає на процес стружкоутворення. Якщо кут намотування збігається з траєкторією вершини різця, то розвивається випереджальна тріщина вздовж траєкторії, а різець ковзає уздовж поверхні волокна, не руйнуючи його. Якщо кут армування не збігається з траєкторією різання, тоді випереджальна тріщина розвивається в напрямку армування і утворюється стружка надлому. Під дією механічної напруги в зоні найбільших дотичних напружень (її приймають за умовну площину зсуву) протікають періодичні зсувні явища, що призводять до пружного руйнування оброблюваного матеріалу і формуванню, в залежності від умов обробки та схеми армування матеріалу, стружки того чи іншого типу.

Утворення гвинтових поверхонь однолезовим інструментом має ряд суттєвих недоліків:

1) інтенсивне викришування мікрочастинок твердого сплаву різця на початку роботи, що призводить до погіршення якості обробленої поверхні та, в деяких випадках, до спотворення профілю гвинтової поверхні;

2) недостатня продуктивність процесу, оскільки гвинтова поверхня нарізається за декілька проходів;

3) невисока стійкість різців;

4) наявність розкуйовдження обробленого профілю гвинтової поверхні, що обумовлює необхідність додаткових операцій – зачищення поверхні;

5) складність заточування спеціальних різців

Поблизу вершини різця на оброблений матеріал впливають деформації розтягування, перпендикулярні до напрямку різання, і деформації стиснення, спрямовані вздовж напрямку різання. Максимальні напруги стиснення спостерігаються при вершині різця. Особливістю обробки армованого пластику

є наявність істотного шару стиснення, який знаходиться нижче лінії зрізу, що призводить до його пружного відновлення. Це є причиною похибки розмірів. Частинки зруйнованого матеріалу (скляні волокна), змішані з частинками затверділого сполучного, розсіюються в повітрі і забруднюють його. При механічній обробці склопластик піддається і тепловому впливу. При цьому відбуваються хімічні перетворення, які супроводжуються виділенням різних низькомолекулярних сполук.

1.7 Висновок

1. Оброблені поверхні виробів з композиту оброблені методом шліфування, забезпечують більш надійну та довговічну роботу конструкцій,в порівнянні з обробленими лезовим інструментом.

2. Формоутворення гвинтових поверхонь точінням має ряд суттєвих недоліків, через які даний метод не знайшов широкого використання в обробці деталей з армованих композиційних матеріалів. Проте використання універсального верстатного обладнання та устаткування, дешевизна матеріалів використовуваного інструменту і багата номенклатура його вибору, забезпечує даному методу обробки гвинтових поверхонь в композитах широке використання.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ДЕФОРМАЦІЙ ДЕТАЛЕЙ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ОБРОБКИ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ

2.1 Характеристики міцності композитів

Останнім часом, питанням дослідження міцності конструкцій з композиційних матеріалів в Україні та в усьому світі, приділяється досить

значна увага. Найсвіжіші дослідження міцності різьбових з'єднань в армованих композиційних матеріалах провів Zemann Richard який досить детально встановив, міцність різьбового з'єднання виконаного у вуглепластиковому армованому композиті [10].

Завдяки своїм перевагам в вазі, та досить високим показникам міцності армовані композиційні матеріали такі як склопластик та вуглепластик досить часто використовуються в промисловості. Особливо зазначені матеріали використовуються у великій кількості для виготовлення фюзеляжів літаків та космічних кораблів, а також в інших галузях промисловості таких як легке машинобудування та приладобудування. Також значне застосування знайшли дані армовані композиційні матеріали в модельному спорті.

Що ж стосується з'єднань представлених композитів то в основному використовуються не роз'ємні з'єднання деталей виготовлених з даних АКМ, такі як клейові та заклепкові, оскільки завдяки своїм анізотропним властивостям досить складно отримати роз'ємне з'єднання яке б задовольняло необхідним показникам міцності.

У випадку з різьбовими з'єднаннями даних АКМ, все набагато складніше, оскільки як було сказано вище, дані композити мають анізотропні властивості, то класичні різьби такі як метрична, дюймова не задовольняють показники міцності для даних з'єднань, оскільки завдяки наявності гострих концентраторів напруг, вони не витримують необхідного навантаження. Все це зв'язано з тим що зазначені, армовані композиційні матеріали не досить добре

витримують навантаження на розтяг та стискання, порівняно з деякими металами, а на зсув взагалі погано себе зарекомендували [11].

При механічній обробці композитів відбувається порушення цілісності поверхневого шару виробу, знімається зовнішній шар полімеризованого сполучника, перерізаються армуючі волокна, все це разом з неминучою механо- і термодеструкцією сполучника в поверхневому шарі може призвести до зниження характеристик міцності виробів. Основний вплив на характеристики міцності виробів з композитів має якість обробки, тобто висота отриманих після обробки мікронерівностей поверхні.

На практиці це можливе зниження міцності необхідно враховувати з двох основних причин.

По-перше, знаючи залежність зниження міцності від висоти мікронерівностей обробленої поверхні, можна шляхом підбору геометрії інструменту та режимів різання забезпечити його мінімальне значення.

По-друге, про міцність виробів судять за результатами випробувань стандартних зразків. Тобто, ці зразки необхідно обробляти так, щоб зниження міцності від механічної обробки було мінімальне, а отримані при випробуваннях значення фізико-механічних характеристик були найбільш близькі до дійсних.

Схема спільної деформації дискретного волокна і матриці при розтягуванні композиту представлена на рис. 2.1. Навантаження, прикладена до композиційному матеріалу, передається на волокно через матрицю дотичними напруженнями на поверхні розділу між волокном і матрицею. Величина їх залежить від адгезійної міцності контакту волокна 1 і матриці 2.

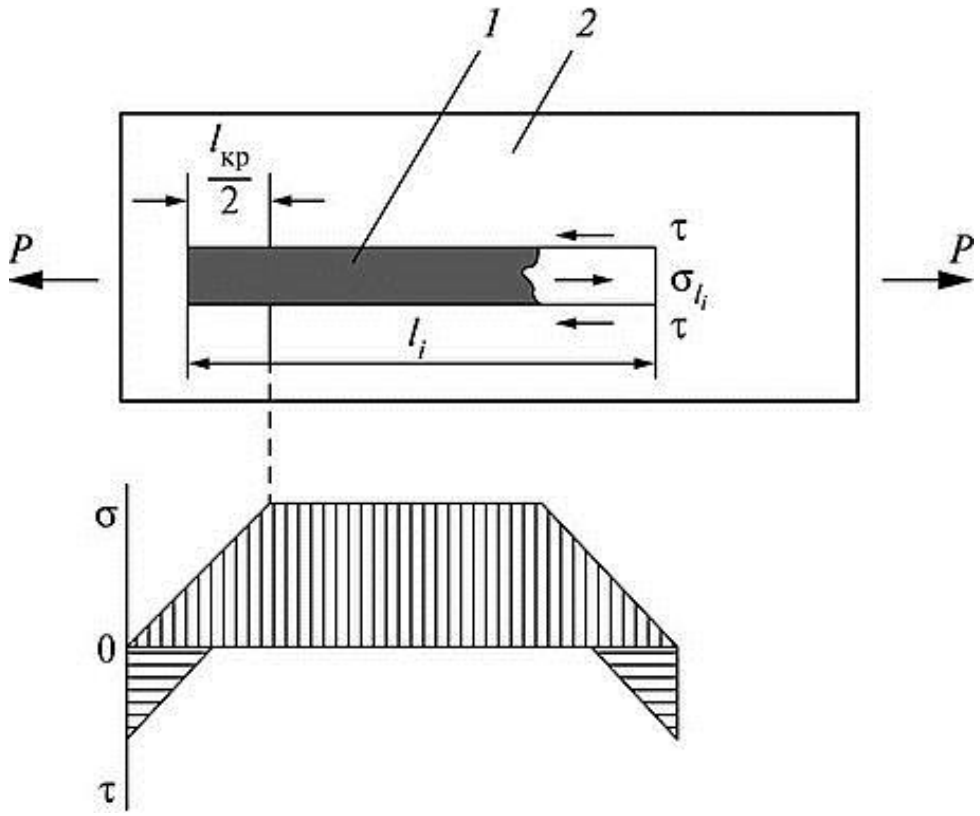


Рисунок 2.1 – Схема навантаження дискретного волокна в пластичній матриці[11]

Важливою характеристикою композиту з дискретним волокнистих наповнювачем є критична довжина волокна. Вона визначається як мінімальна довжина волокна, яка необхідна для сприйняття через матрицю навантаження, що дорівнює навантаженню безперервних волокон. Точка прикладання максимального навантаження розташована на половині довжини дискретного волокна. Критична довжина волокна пропорційна його діаметру і міцності, зі збільшенням міцності зв'язку волокна і матриці критична довжина волокон зменшується.

При довжині волокна $l < l_{кр}$ максимальна напруга, що передається через матрицю на волокно, менше межі міцності волокна, внаслідок чого фізико-механічні властивості волокна не повністю реалізуються в міцності композиційного матеріалу. Руйнування такого композиту відбувається шляхом витягування волокна з матриці в міру розвитку мікротріщини руйнування.

При $l = l_{кр}$ максимальна напруга в середній частині дискретного волокна досягає межі міцності, що реалізується в нескінченно довгому волокні. Однак через недостатню поверхню контакту з максимальним питомим навантаженням реалізація міцності волокна в композиті хоча і вище, ніж за умови $l < l_{кр}$, але також недостатня. Зі збільшенням виразу $l_{кр}$ при збереженні рівня максимальних питомих навантажень поверхню їх застосування збільшується з відповідним зростанням сприйманого волокном зусилля. У міру зростання виразу $l_{кр}$ рівні реалізації міцності дискретних і безперервних волокон в композиційному матеріалі

зближуються (рис. 2.2).

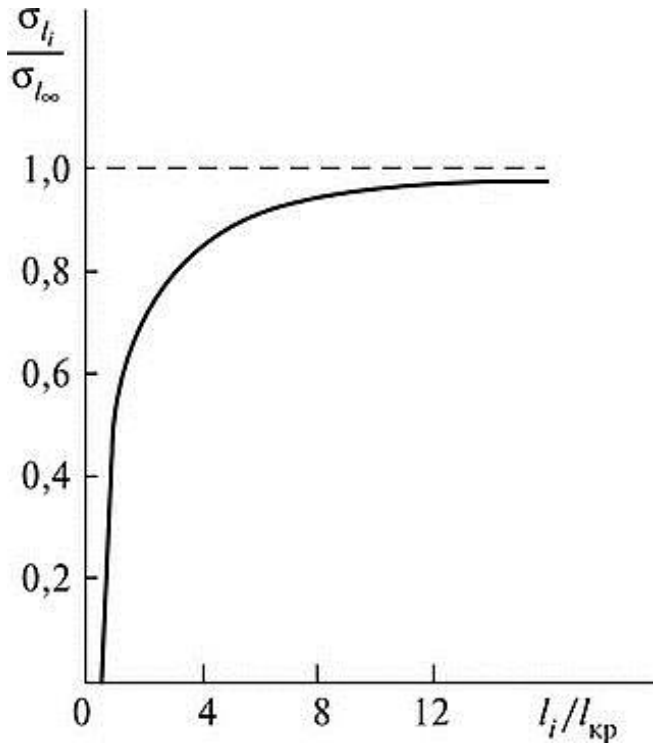


Рисунок 2.2 – Вплив довжини волокна на міцність композиційного матеріалу[11]

Для розрахунку міцності композиційного матеріалу з односпрямованим волокнистих наповнювачем використовують наступну залежність:

$$\delta_{к=С_в-у_в+\delta_м-у_м}, \quad (2.1)$$

де $\delta_к$ - міцність відповідно композиту і волокна;

$\delta_м$ - міцність матриці;

$У_в$, $У_м$- об'ємні частки в композиті відповідно волокна і матриці.

Експериментально визначити обсяг матриці, яка бере участь в передачі навантаження на наповнювач, важко.

Вираз (2.1) характеризує прямолінійну залежність властивостей композиційного матеріалу від вмісту в ньому волокнистого наповнювача. Теоретичним значенням верхньої межі об'ємного змісту безперервних односпрямованих волокон в композиційному матеріалі є теоретична щільність упаковки волокон, що дорівнює 90,7% при гексагональном і 78,5% при тетрагонального розташуванні волокон.

Однак при великому вмісті волокон виникають технологічні труднощі рівномірного змочування волокон матрицею, що погіршує міцність їх з'єднання і призводить до утворення пустот, знижуючи конструкційну міцність композиційного матеріалу. Тому верхня межа об'ємного вмісту волокон визначається з екстремального значенням міцності, яке в реальних композитах рідко перевищує 60% (рис. 2.3).

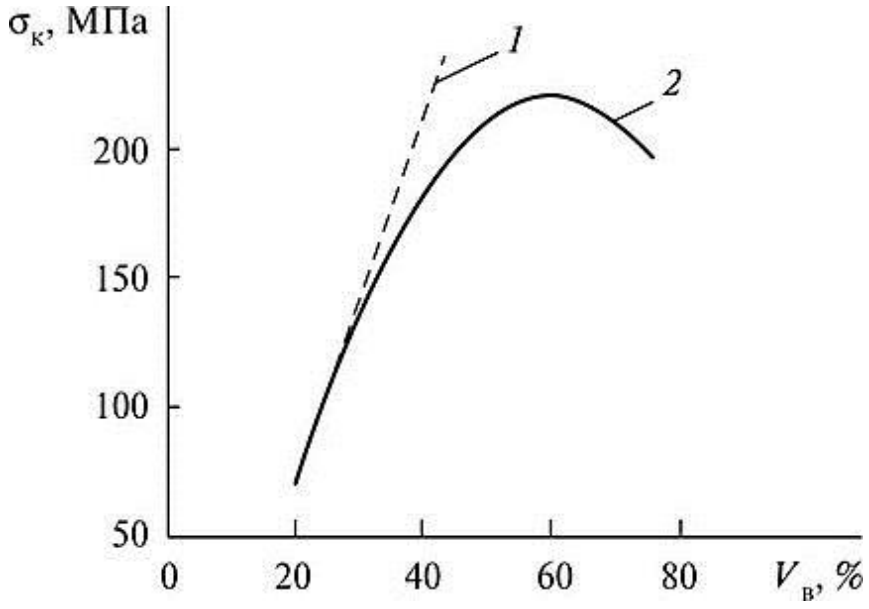


Рисунок 2.3 - Вплив змісту скляних волокон на міцність композиційного матеріалу на епоксидної матриці: 1- теоретична залежність; 2 - експериментальні дані [11]

Падіння міцності композиту при подальшому підвищенні вмісту дискретних волокон пояснюється недоліком матричної фази для забезпечення рівномірного розподілу робочого навантаження між матрицею і волокном. Теоретичне значення нульової міцності композиту відповідає граничної щільності упаковки волокон, що передбачає повну відсутність прошарку матриці між окремими волокнами.

Характер залежності міцності композиту від вмісту в ньому волокон узгоджується з механізмом руйнування композиційних матеріалів з волокнистих наповнювачем (рис. 2.4).

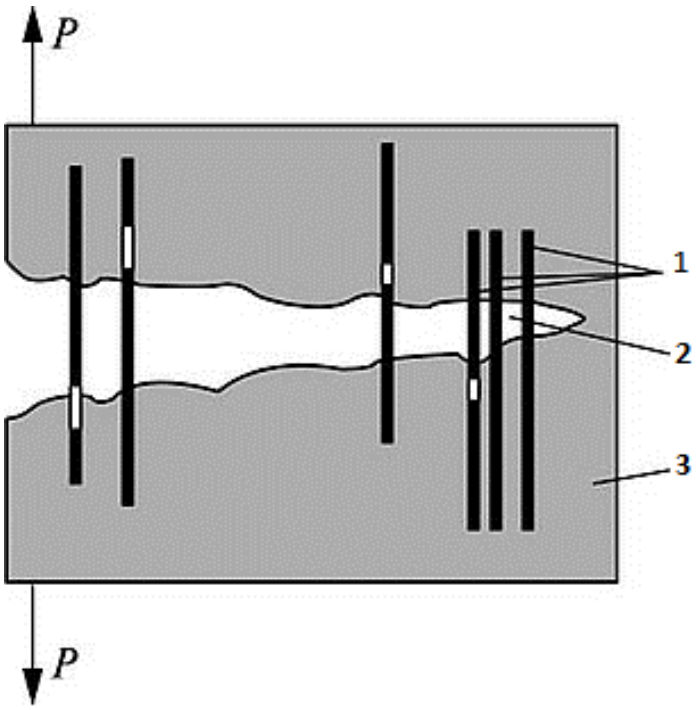


Рисунок 2.4 – Схема руйнування композиційного матеріалу з волокнистих наповнювачем: 1 - волокна; 2 - тріщина; 3 – композит [11]

Після першого розриву волокна деталь з композиційного матеріалу залишається незруйнованої і продовжує виконувати свої функції. Навантаження через пластичну матрицю перерозподіляється на решту цілими волокна і на частини зруйнованого волокна. При подальшому навантаженні волокна будуть дробитися на відрізки все меншої довжини.

Зруйновані волокна будуть сприймати навантаження як дискретні волокна, поки не роздрібнити до довжини $l = l_{\text{кр}}$. Волокна такої довжини під дією зовнішнього навантаження будуть, не руйнуючись, витягуватися з матриці. Несуча здатність композиційного матеріалу при цьому зберігається на рівні витрат прикладеного навантаження на витягування волокон з матриці. Міцність композиту буде визначатися міцністю адгезійного контакту на кордоні волокно - матриця.

Такий механізм роботи композиційного матеріалу з волокнистих наповнювачем об'єктивно відбивається в характері діаграми деформації композиту (рис. 2.5). Наприклад, конструкційний графіт, досягнувши граничного значення навантаження, необоротно руйнується (крива l). При

граничному значенні навантаження композиційний матеріал системи «вуглець - вуглець» з волокнистих наповнювачем, в якому конструкційний графіт служить матрицею, не руйнується миттєво, а деякий час зберігає несучу здатність (крива 2). Відрізок АВ характеризує процес опору матеріалу поширенню утворилася при граничному навантаженні тріщини шляхом витягування решт розриваються волокон з матриці.

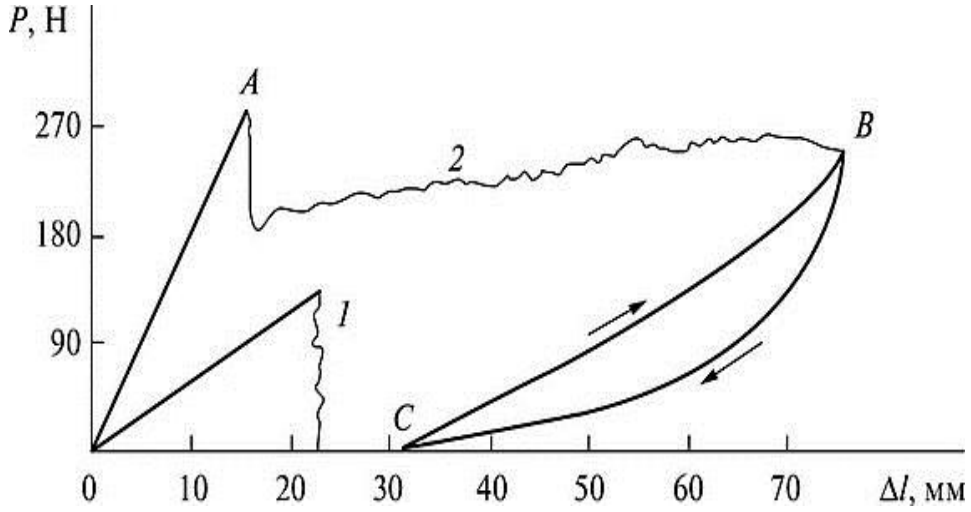


Рисунок 2. 5 – Вплив волокнистого наповнювача на діаграму деформації конструкційного графіту (1) і композиційного матеріалу на його основі з волокнистих наповнювачем (2) [11]

2.2 Висновок

Дослідивши характеристики міцності композитів і розглянувши механізм руйнування армованих композиційних матеріалів з волокнистих наповнювачем можна з впевненістю стверджувати про їх високу конструктивну надійність.

Деформований, але не зруйнований композиційний матеріал допускає можливість повторного прикладення навантаження, близького до граничного значення для композиту, але істотно більшого ніж межа міцності не зміцненої волокнами матриці.

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ДЕФОРМАЦІЙ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Методи дослідження напружено-деформованого стану з’єднань з армованих композиційних матеріалів

На сьогоднішній день існує безліч різноманітних методів дослідження армованих композиційних матеріалів за напружено-деформованим станом. Як правило, розрахунок ведеться на основі різних типів з’єднання в АКМ, таких як болтові, клейові та заклепкові. Сама суть розрахунку зводиться до моделювання скінченно-елементного аналізу або ж за допомогою методів числового розрахунку.

Розглянемо способи дослідження напружено-деформованого стану для трьох типів з’єднання армованих композиційних матеріалів приведених вище. Для розрахунку деформацій деталей з АКМ для прикладу було взяте роз’ємне з’єднання. Для розрахунку за основу було взято метод скінченно-елементного аналізу з інтегруванням в часі явним методом використовуючи програмний продукт LS-DYNA компанії LSTC.

Чисельні методи, на даний момент, є найбільш актуальними методами розрахунку напружено-деформованого стану з'єднань з армованих композиційних матеріалів, так як дають найбільш точну інформацію за різними параметрами з мінімальною похибкою, зокрема в геометричних та механічних параметрах [12].

В першу чергу вибирається модель чи моделі суцільного середовища досліджуваних зразків (з’єднуваних частин). При цьому експериментальне визначення потрібних параметрів є важливою і необхідною умовою.

Наступним кроком формалізуються всі математичні аспекти для вирішення завдань даного дослідження. В подальшому дане завдання будь-яким способом необхідно звести до алгебраїчного, що дозволяє вирішити його з використанням засобів обчислювальної техніки. Це дозволяє проаналізувати

точність апроксимації диференційованих рівнянь кінцевими алгебраїчними, перевірити цілісність розрахункової системи, її стійкість та розв’язність, а також проаналізувати ефективність обраного методу розв’язання [13].

Далі необхідно лише запрограмувати і провести розрахунки використовуючи програмні комплекси, різноманітність яких на сьогодні досить висока.

Числові методи розрахунку умовно поділяють:

- методи скінчено-елементного аналізу (МСЕА) і деякі варіанти методу скінченних різниць (МСР). Ці методи вимагають значних обсягів машинної пам'яті, але досить економічні за кількістю виконуваних комп'ютером операцій;
- послідовні методи розрахунку (явні і неявні варіанти МСР).

3.2 Математичне формулювання моделі напружено-деформованого стану різьбового з’єднання з круглою різьбою формоутвореного в АКМ.

В роботі розглядається два об’єкти: гайка з армованого композиційного матеріалу і металева вставка з зовнішньою різьбою. Система змодельована так що склопластикова гайка та металева вставка зорієнтовані в просторі таким чином що вони можуть взаємодіяти одна з одним. Необхідно визначити значення зовнішніх сил які діють на вставку поки не зруйнується внутрішня різьба гайки з композиту. Дані об’єкти взаємодіють один з одним внутрішніми і зовнішніми контактними поверхнями, за рахунок чого в них виявляються деформації під дією контактних сил, обумовлених заданою моделлю тертя у відповідних місцях контактних поверхонь. В результаті опору об’єктів деформаціям виникають внутрішні напруження у відповідності до заданої моделі матеріалу. Зрозуміло, що в разі недостатньою міцності дослідного зразка відбувається його руйнування.

Система яку потрібно вирішити для заданих умов складається з наступних рівнянь:

1. Диференційовані рівняння руху:

$$\rho\ddot{u}_\iota = \rho f_i + \sigma_{ij,j};\ i = 1,2,3,;j = 1,2,3. \tag{3.1}$$

2. Результуюча сила:

$$f = f_{load} + f_{contact} - I. \tag{3.2}$$

3. Зв’язок прискорень зі швидкостями переміщень та за переміщеннями:

$$\ddot{u}_\iota = \int \ddot{u}_i\, d\tau;\ u_i = \int u_i\, d\tau. \tag{3.3}$$

4. Зв’язок швидкостей деформацій зі швидкостями переміщень:

$$\dot{\varepsilon_{\iota J}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \dot{u_\iota}}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u_J}}{\partial x_i}\right). \tag{3.4}$$

5. Рівняння нерозривності:

$$\rho = \rho_0 \det(F). \tag{3.5}$$

6. Зв’язок збільшення повних деформацій зі швидкостями деформацій:

$$d\varepsilon_i = \dot{\varepsilon}_i d\tau. \tag{3.6}$$

7. Зв'язок прирощення повних деформацій з прирощеннями пластичних пружних деформацій:

$$d\varepsilon_i = d\varepsilon_i^e + d\varepsilon_i^p. \tag{3.7}$$

8. Рівняння зв’язку напруг з деформаціями:

$$p = K\left(\frac{1}{\det(F) - 1}\right); s_{ij} = C^e\left(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p\right). \quad (3.8)$$

9. Умова навантаження-розвантаження Куна-Такера:

$$\dot{\lambda} \geq 0, \Phi \leq 0, \dot{\lambda}\Phi = 0, \dot{\lambda}_{ij} = \dot{\bar{\varepsilon}}^p \frac{d\Phi}{d\sigma_{ij}}. \quad (3.9)$$

10. Зв'язок компонент напруження деформації:

$$\sigma = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}};\ \sigma_{ij} = s_{ij} - \frac{1}{3} tr(p), \dot{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p}, \bar{\varepsilon}^p = \int \dot{\bar{\varepsilon}}^p d\tau. \quad (3.10)$$

11. Умова руйнування: $\mathrm{D} = \sum \frac{\Delta\bar{\varepsilon}^p}{\bar{\varepsilon}_f^p\left(\frac{p}{\sigma_s, \dot{\bar{\varepsilon}}^p, T}\right),} \geq 1$ (фізичний критерій),

$$\sigma^* = \frac{p}{\sigma_s T^*} = (T - T_0)/(T_{\text{пл}} - T_0), \quad (3.12)$$
$$\bar{\varepsilon}_f^p = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*))(1 + D_4 \ln \dot{\bar{\varepsilon}})(1 + D_5 T^*)$$

В приведених рівняннях прийняті такі умовні позначення: τ – час; T – температура; F – градієнт руху; u_i – вектор переміщення; x_i – вектор координат; σ_{ij} – тензор навантажень; s_{ij} – девіатор напружень; ρ – густина; P – гідростатичний тиск(має плюсові значення при стисканні); C^e – тензор пружніх коефіцієнтів; ε_{ij} – тензор деформацій; f_{load} – інтенсивність зовнішніх сил; $f_{contact}$ – інтенсивність сил на контактній границі тіл; f_i – інтенсивність об’єму сил; I – інтенсивність внутрішніх сил.

Початкові умови задаються наступним чином:

$$\tau = 0; \forall \mathrm{M} \in \mathrm{B} \cup \Gamma;\ \mathrm{x_i^0} = x_i^0(M); \sigma_{ij}^0(M) = 0;$$

$$\rho_0 = \rho_0(M);\ \varepsilon_{ij}^0(M) = 0; \bar{\varepsilon}^p = 0; T_0(M) = T_c.$$

Граничні умови на внутрішніх границях гайки:

$$\sum_{г\infty} \forall M \in \sum_{г\infty};$$

$$u_i(M) == 0, T(M) = T_c \text{ та вставки } \sum_{в\infty} \forall M \in \sum_{в\infty};$$

$$\dot{u}_x(M) = V_x, \dot{u}_y(M) = V_y, T(M) = T_c\ .$$

На контактній поверхні $\sum_{гв}$ яка є геометрично єдиною частиною для поверхні гайки $\sum_{г}$ та вставки $\sum_{в}$ тобто $\sum_{гв} \in \sum_{в} \cap \sum_{г}$:

$$\forall M \in \sum_{гв};$$

$$\dot{g} = (\dot{u}_i)_{\sum г}\ n_i - (\dot{u}_i)_{\sum в} n_i;$$

$$\sigma_n \le 0; \dot{g} \ge 0;\ \sigma_n \cdot \dot{g} = 0;$$

$$\frac{q_{\sum г}}{q_{\sum в}} = \frac{\sqrt{\lambda_г c_г \rho_г}}{\sqrt{\lambda_в c_в \rho_в}};$$

$$q_m R^* = T_{\sum г} - -T_{\sum в};$$

$$q_M = \tau_n V_c - (q_{\sum г} + q_{\sum в}),$$

де σ_n – контактні нормальні напруження,

$V_c = \left|\dot{u}_i\ |_{\sum в} - \dot{u}_i\ |_{\sum г}\right|$ дотичні напруження

τ_n – згідно моделі M. S. Shaw:

$$\tau_i = \tau_a + \tau_d, \tau_d = \mu_d \sigma_n, \tau_a = \tau_0 + (\beta_0 - k_b \cdot \max(0; T - T_k)) \cdot \sigma_{nr}. \qquad (3.12)$$

умова дотикання:

$$\begin{cases} V_c = 0, \text{якщо} |\tau_n| < \tau_{max} - \text{приєднання на контактній границі} - \\ \qquad\qquad \text{внутрішнє тертя}, \\ V_c > 0, \text{якщо} |\tau_n| = \tau_{max} - \text{ковзання на контакній границі} - \\ \qquad\qquad \text{зовнішнє тертя} \end{cases} \tag{3.13}$$

де τ_{max} – максимальні дотичні напруження опору ковзанню в заданій точці моделі на контактній поверхні, на границі між зонами $\sum_v \in M$ та ковзання $\sum_\tau \in M \sigma_{ij} |_{\sum v} = \sigma_{ij} |_{\sum \tau}; \dot{u}_i |_{\sum v} = \dot{u}_i |_{\sum \tau}$ в зоні приєднання $\forall G \in \sum v \, \dot{u}_i |_{\sum в} = \dot{u}_i |_{\sum г}$.

3.3 Математичний опис моделі АКМ для визначення НДС з'єднання методом скінчено-елементного аналізу

Найчастіше конструкції з армованих композиційних матеріалів складаються з комбінації орієнтованих по різному односпрямованих шарів. При цьому руйнування більш «слабкого» шару при статичному чи динамічному навантаженні може відбуватися раніше, ніж настане момент граничного стану АКМ в цілому.

Армовані композиційні матеріали з регулярною структурою, в основному мають в собі односпрямовані шари, що дозволяє знаходити ефективні характеристики окремо взятих шарів на макрорівні, при цьому не беручи до уваги неоднорідність структури кожного шару на мікрорівні. В даному випадку модель деформації матеріалу матиме вигляд складеної з різних шарів квазіоднорідної структури. Через це армовані композиційні матеріали виготовлені в одній партії можуть відрізнятися за властивостями один від одного.

Для отримання математичного опису моделі матеріалу в першу чергу необхідно мати дані пружних характеристик АКМ, що дозволяє зробити розрахунок за Фойгтом і Рейсом [14, 15-19]. А за основу отримання

математичного опису моделі АКМ були взяті теоретичні розрахунки проведені Верещакою С. М. у роботі [20].

Склопластиковий армований матеріал розглядається як пружне ортотропне тіло, для якого розрахункові залежності пружних характеристик високомодульного шару волокон мають вигляд:

$$E_1 = \psi_1 E_в + \frac{(1-\psi_1)(1+\psi_3)}{1-\psi_3} E_м, \tag{3.14}$$

$$E_2 = \frac{\psi_1 (1+\psi_1)(1+\psi_3)}{(1-\psi_1)(1-\psi_3)(1-\nu_в^2)} E_м, \tag{3.15}$$

$$E_3 = \psi_3 E_в + \frac{(1+\psi_1)(1+\psi_3)}{(1-\psi_1)(1-\nu_в^2)} E_м, \tag{3.16}$$

$$\nu_{12} = \frac{\nu_в (1+\psi_3)(1+\psi_1)}{\psi_1 (1-\psi_3)(1-\psi_1)(1-\nu_в^2)} \frac{E_м}{E_в}, \tag{3.17}$$

$$\nu_{13} = \nu_в \psi_3 + (1-\psi_3)\nu_м, \tag{3.18}$$

$$\nu_{23} = \nu_B \psi_3 + (1-\psi_3)\nu_м, \tag{3.19}$$

$$G_{12} = \frac{1+\psi_1}{(1-\psi_1)(1+\psi_3)} G_м, \tag{3.20}$$

$$G_{23} = \frac{1+\psi_3}{(1-\psi_3)(1-\psi_1)} G_м, \tag{3.21}$$

$$G_{13} = \frac{(1+\psi_1)(1+\psi_3)}{(1-\psi_1)(1-\psi_3)} G_м, \tag{3.22}$$

де E_1, E_2, E_3 – модулі пружності у відповідному напрямку x_1, x_2, x_3 ; G_{23}, G_{13}, G_{12} – модулі зсуву відповідно у площинах x_20x_3, x_10x_3, x_10x_2; v_{ij} – коефіцієнт Пуассона, перший індекс вказує на напрям діючого напруження, а другий – на напрям поперечної деформації, що виникає при цьому; $E_м$ та $E_в$ – модулі пружності матриці та волокна відповідно; $\nu_м$ і $\nu_в$ – коефіцієнти Пуассона матриці та волокна;

$G_м$, $G_в$ – модуль зсуву матриці та волокна, а ψ_1, ψ_3 – відносний об’ємний вміст арматури шару в напрямку осей 1 і 3 (рис. 3.1).

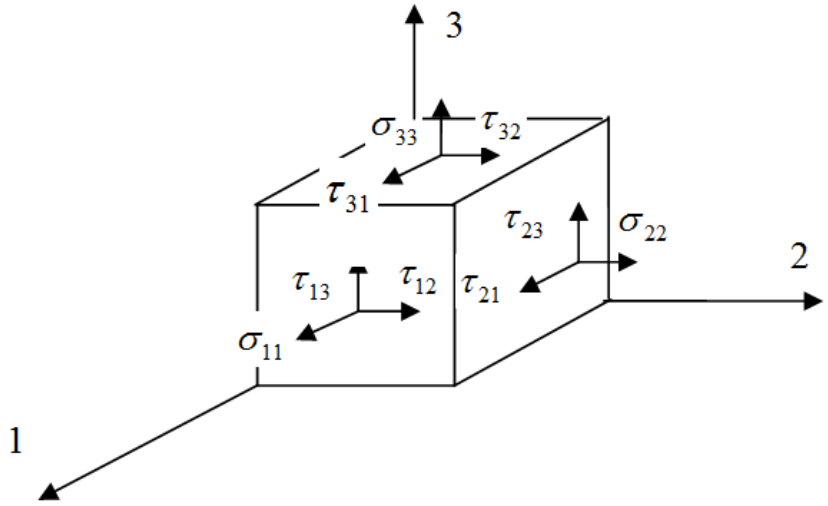


Рисунок 3.1 – Об’ємний напружений стан у точці односпрямованого матеріалу[21].

Коефіцієнт армування ψ_1 , що характеризує відносний об’ємний вміст волокон, можна визначити за формулою:

$$\psi_1 = \frac{\pi (d_в)^2}{4h} i_в , \tag{3.23}$$

де h – товщина армованого шару; $d_в$ – діаметр волокон; $i_в$ – частота армування. Величина ψ_3 визначається за допомогою емпіричних залежностей і, як правило, змінюється в інтервалі $\psi_3 = (0.05 - 0.15)\psi_1$. Геометрія односпрямованого армованого шару показана на рис. 3.2.

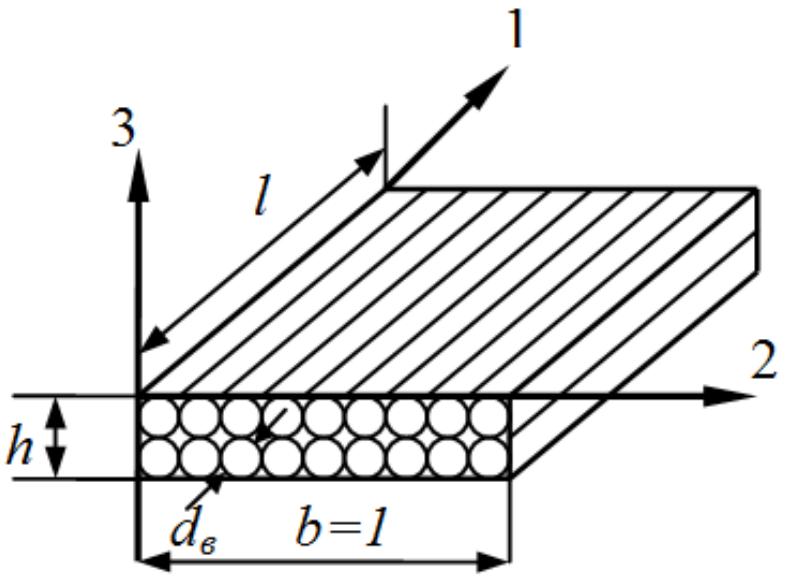


Рисунок 3.2 – Геометрія односпрямованого армованого шару [21]

Співвідношення пружності для ортотропного односпрямованого армованого шару в його осях симетрії 1, 2, 3 з урахуванням технічних сталих за рівняннями (3.14) – (3.22), у матричній формі мають вигляд:

$$\{\sigma\} = [A_0]\{\varepsilon\}, \qquad \{\varepsilon\} = [B_0]\{\sigma\}, \tag{3.24}$$

де $\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$, $\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$ – матриці – стовпці

напружень і деформацій шару в напрямку осей симетрії 1, 2, 3 (рис. 3.1);

$$[A_0]=\begin{bmatrix} a_{11}^0 & a_{12}^0 & a_{13}^0 & 0 & 0 & 0 \\ & a_{22}^0 & a_{23}^0 & 0 & 0 & 0 \\ & & a_{33}^0 & 0 & 0 & 0 \\ & \textit{сим.} & & a_{44}^0 & 0 & 0 \\ & & & & a_{55}^0 & 0 \\ & & & & & a_{66}^0 \end{bmatrix},$$

$$[B_0]=\begin{bmatrix} b_{11}^0 & b_{12}^0 & b_{13}^0 & 0 & 0 & 0 \\ & b_{22}^0 & b_{23}^0 & 0 & 0 & 0 \\ & & b_{33}^0 & 0 & 0 & 0 \\ & \textit{сим.} & & b_{44}^0 & 0 & 0 \\ & & & & b_{55}^0 & 0 \\ & & & & & b_{66}^0 \end{bmatrix}-$$

матриці жорсткості та піддатливості ортотропного шару в напрямку осей симетрії 1, 2, 3 відповідно.

Розв’язуючи одночасно дві системи рівнянь (3.24) щодо коефіцієнтів жорсткості a_{ij}^0, можна знайти такі співвідношення:

$$a_{11}^0=\left[b_{22}^0b_{33}^0-\left(b_{23}^0\right)^2\right]\Delta^{-1},\quad a_{22}^0=\left[b_{11}^0b_{33}^0-\left(b_{13}^0\right)^2\right]\Delta^{-1},$$

$$a_{33}^0=\left[b_{11}^0b_{22}^0-\left(b_{12}^0\right)^2\right]\Delta^{-1},\quad a_{12}^0=\left[b_{13}^0b_{23}^0-b_{12}^0b_{33}^0\right]\Delta^{-1},$$

$$a_{13}^0=\left[b_{12}^0b_{23}^0-b_{22}^0b_{13}^0\right]\Delta^{-1},\quad a_{23}^0=\left[b_{12}^0b_{13}^0-b_{11}^0b_{23}^0\right]\Delta^{-1},$$

$$\Delta = b_{11}^0 b_{22}^0 b_{33}^0 + b_{12}^0 b_{23}^0 b_{31}^0 + b_{21}^0 b_{32}^0 b_{13}^0 - b_{13}^0 b_{22}^0 b_{31}^0 - b_{21}^0 b_{12}^0 b_{33}^0 - b_{11}^0 b_{32}^0 b_{23}^0,$$

$$a_{44}^0 = \frac{1}{b_{44}^0}, \quad a_{55}^0 = \frac{1}{b_{55}^0}, \quad a_{66}^0 = \frac{1}{\hat{a}_{66}^0}. \tag{3.25}$$

Коефіцієнти піддатливості b_{ij}^0 можна записати за допомогою технічних сталих:

$$b_{11} = \frac{1}{E_1}, \; b_{12}^0 = -\frac{\nu_{21}}{E_2}, \; b_{13}^0 = -\frac{\nu_{31}}{E_3}, \; b_{21}^0 = -\frac{\nu_{12}}{E_1},$$

$$b_{22} = \frac{1}{E_2}, \; b_{23}^0 = -\frac{\nu_{32}}{E_3}, \; b_{31}^0 = -\frac{\nu_{13}}{E_1}, \; b_{32}^0 = -\frac{\nu_{23}}{E_2}, \tag{3.26}$$

$$b_{33}^0 = \frac{1}{E_3}, \quad b_{44}^0 = \frac{1}{G_{23}}, \quad b_{55}^0 = \frac{1}{G_{13}}, \quad b_{66}^0 = \frac{1}{G_{12}}$$

Оскільки у нашому випадку армований композит складається із кількох різноорієнтованих шарів односпрямованого матеріалу. Відповідно до рис. 3.3 маємо такі системи координат: загальну α, β, z та локальні $1^{(k)}$, $2^{(k)}$, z (k = 1,2, . . . , n). Тут k – номер односпрямованого шару в пакеті багатошарового матеріалу, n – кількість шарів, $\varphi^{(k)}$ – кут між осями загальної системи координат та осями локальної системи координат k-шару композита. Можна побачити, що в повернених осях α, β, z армований шар має анізотропні властивості й одну площину пружної симетрії. Тоді стають доречними співвідношення пружності:

$$\left\{\sigma_{\alpha\beta}^{(k)}\right\} = \left[A_{\varphi}^{(k)}\right]\left\{\varepsilon_{\alpha\beta}^{(k)}\right\}, \tag{3.27}$$

де $\left\{\sigma_{\alpha\beta}^{(k)}\right\} = \left\{\sigma_{\alpha}^{(k)}, \sigma_{\beta}^{(k)}, \sigma_{z}^{(k)}, \tau_{\beta z}^{(k)}, \tau_{\alpha z}^{(k)}, \tau_{\alpha\beta}^{(k)}\right\}^{\grave{O}}$,

$$\left\{\varepsilon_{\alpha\beta}^{(k)}\right\}=\left\{\varepsilon_{\alpha}^{(k)},\ \varepsilon_{\beta}^{(k)},\ \varepsilon_{z}^{(k)},\ \gamma_{\beta z}^{(k)},\ \gamma_{\alpha z}^{(k)},\ \gamma_{\alpha\beta}^{(k)}\right\}^{\grave{O}}\ -$$

матриці – стовпці напружень і деформацій k-шару в напрямку осей α, β, z ;

$$\left[A_{\varphi}^{(k)}\right]=\begin{bmatrix} a_{11}^{\varphi(k)} & a_{12}^{\varphi(k)} & a_{13}^{\varphi(k)} & 0 & 0 & 0 \\ & a_{22}^{\varphi(k)} & a_{23}^{\varphi(k)} & 0 & 0 & 0 \\ & & a_{33}^{\varphi(k)} & 0 & 0 & 0 \\ & \textit{сим.} & & a_{44}^{\varphi(k)} & a_{45}^{\varphi(k)} & 0 \\ & & & & a_{55}^{\varphi(k)} & 0 \\ & & & & & a_{66}^{\varphi(k)} \end{bmatrix}\ -$$

матриця коефіцієнтів жорсткості k-анізотропного шару в напрямку осей α, β, z загальної системи координат.

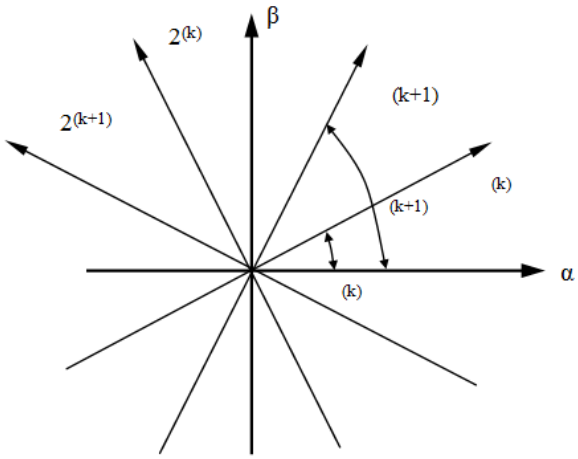


Рисунок 3.3 – Системи координат багатошарового композиту [21]

Для подальшого викладання матеріалу систему рівнянь (3.27) зручно подати у вигляді:

$$\left\{\sigma_{\alpha}^{(k)}\right\}=\left[A_{\alpha}^{(k)}\right]\left\{\varepsilon_{\alpha}^{(k)}\right\},\quad \left\{\sigma_{\alpha 3}^{(k)}\right\}=\left[A_{\alpha 3}^{(k)}\right]\left\{\varepsilon_{\alpha 3}^{(k)}\right\},\qquad (3.28)$$

де $\left\{\sigma_{\alpha}^{(k)}\right\}=\left\{\sigma_{\alpha}^{(k)},\ \sigma_{\beta}^{(k)},\ \sigma_{z}^{(k)},\ \tau_{\alpha\beta}^{(k)}\right\}^{T}$, $\left\{\sigma_{\alpha 3}^{(k)}\right\}=\left\{\tau_{\beta z}^{(k)},\ \tau_{\alpha z}^{(k)}\right\}^{T}$,

$$\left\{\varepsilon_{\alpha}^{(k)}\right\}=\left\{\varepsilon_{\alpha}^{(k)},\ \varepsilon_{\beta}^{(k)},\ \varepsilon_{z}^{(k)},\ \gamma_{\alpha\beta}^{(k)}\right\}^{T},\quad \left\{\varepsilon_{\alpha 3}^{(k)}\right\}=\left\{\gamma_{\beta z}^{(k)},\ \gamma_{\alpha z}^{(k)}\right\}^{T},$$

$$\left[A_{\alpha}^{(k)}\right]=\begin{bmatrix} a_{11}^{\varphi(k)} & a_{12}^{\varphi(k)} & a_{13}^{\varphi(k)} & a_{16}^{\varphi(k)} \\ & a_{22}^{\varphi(k)} & a_{23}^{\varphi(k)} & a_{26}^{\varphi(k)} \\ & \textit{сим.} & a_{33}^{\varphi(k)} & a_{36}^{\varphi(k)} \\ & & & a_{66}^{\varphi(k)} \end{bmatrix},$$

$$\left[A_{\alpha 3}^{(k)}\right]=\begin{bmatrix} a_{44}^{\varphi(k)} & a_{45}^{\varphi(k)} \\ \textit{сим.} & a_{55}^{\varphi(k)} \end{bmatrix} \tag{3.29}$$

У разі, коли армований композит є набором n різнозорієнтованих шарів односпрямованого матеріалу, зведені пружні характеристики розглянутого пакета шарів знаходять із співвідношень:

$$\left\{\sigma_{\alpha}\right\}=\left[A_{\alpha}\right]\left\{\varepsilon_{\alpha}\right\},\quad \left\{\sigma_{\alpha 3}\right\}=\left[A_{\alpha 3}\right]\left\{\varepsilon_{\alpha 3}\right\} \tag{3.30}$$

або

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{\alpha} \\ \sigma_{\beta} \\ \sigma_{z} \\ \tau_{\alpha\beta} \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{16} \\ & a_{22} & a_{23} & a_{26} \\ & \textit{сим.} & a_{33} & a_{36} \\ & & & a_{66} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \varepsilon_{\alpha} \\ \varepsilon_{\beta} \\ \varepsilon_{z} \\ \gamma_{\alpha\beta} \end{Bmatrix},$$

$$\begin{Bmatrix} \tau_{\beta z} \\ \tau_{\alpha z} \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} a_{44} & a_{45} \\ \textit{сим.} & a_{55} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \gamma_{\beta z} \\ \gamma_{\alpha z} \end{Bmatrix},$$

де $a_{ij} = \sum_{k=1}^{n} a_{ij}^{\varphi(k)} \overline{h}^{(k)}$.

Технічні сталі багатошарового композиту при розтяганні можна одержати, перетворивши систему рівнянь (3.30) до вигляду

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha &= a_{11}\varepsilon_\alpha + a_{12}\varepsilon_\beta + a_{13}\varepsilon_z + a_{16}\gamma_{\alpha\beta}, \\ 0 &= a_{12}\varepsilon_\alpha + a_{22}\varepsilon_\beta + a_{23}\varepsilon_z + a_{26}\gamma_{\alpha\beta}, \\ 0 &= a_{13}\varepsilon_\alpha + a_{23}\varepsilon_\beta + a_{33}\varepsilon_z + a_{36}\gamma_{\alpha\beta}, \\ 0 &= a_{16}\varepsilon_\alpha + a_{26}\varepsilon_\beta + a_{36}\varepsilon_z + a_{66}\gamma_{\alpha\beta}. \end{aligned} \tag{3.31}$$

Підставивши вираз $E_\alpha = \sigma_\alpha / \varepsilon_\alpha$ у перше рівняння системи рівнянь (3.31), попередньо записавши деформації ε_β, ε_z, $\gamma_{\alpha\beta}$ як функції параметра ε_α за допомогою 3 останніх рівнянь (3.31), неважко знайти значення E_α :

$$E_\alpha = \frac{\det[A_\alpha]}{\mathrm{M}_{11}} \tag{3.32}$$

У формулі (3.32) M_{11} – мінор елемента a_{11} узагальненої матриці $[A_\alpha]$. Аналогічним шляхом знаходять інші значення технічних сталих:

$$E_\beta = \frac{\det[A_\alpha]}{\mathrm{M}_{22}}, \qquad E_z = \frac{\det[A_\alpha]}{\mathrm{M}_{33}}, \tag{3.33}$$

де E_β, E_z – модулі пружності першого роду;

$$G_{\alpha\beta} = \frac{\det[A_\alpha]}{\mathrm{M}_{44}}, \quad G_{\alpha 3} = a_{55} - \frac{(a_{45})^2}{a_{44}}, \quad G_{\beta 3} = a_{44} - \frac{(a_{45})^2}{a_{55}}, \tag{3.34}$$

де $G_{\alpha\beta}$, $G_{\alpha 3}$, $G_{\beta 3}$ – модулі зсуву;

$$\nu_{\alpha\beta} = \frac{M_{12}}{M_{11}}, \quad \nu_{\alpha z} = \frac{M_{13}}{M_{11}}, \quad \nu_{\beta z} = \frac{M_{23}}{M_{22}}, \tag{3.35}$$

де $\nu_{\alpha\beta}$, $\nu_{\alpha z}$, $\nu_{\beta z}$ – коефіцієнти Пуассона. Інші три значення коефіцієнтів Пуассона $\nu_{\beta\alpha}, \nu_{z\alpha}, \nu_{z\beta}$ знаходять за допомогою співвідношень

$$\nu_{ij} E_j = \nu_{ji} E_i \quad (i, j = \alpha, \beta, z). \tag{3.36}$$

Тут перший індекс коефіцієнта Пуассона вказує на напрямок дії сили, а другий – на напрямок поперечної деформації, викликаної цією силою.

3.4 Моделювання напружено-деформованого стану гвинтових поверхонь в деталях виготовлених з АКМ, методом скінчено-елементного аналізу

Розрахунок напружено-деформованого стану гвинтових поверхонь проводився методом скінченно-елементного аналізу на прикладі різьбового з'єднання з круглою різьбою.

Основні параметрами які впливають нормальну роботу з'єднання: ***p*** – крок гвинтової поверхні, та ***t*** – глибина профілю гвинтової поверхні ISO 10208 [22] та DIN 20317 [23].

За основу гвинтової поверхні була взята різьба з аналогічними параметрами до метричної різьби М6х1 ГОСТ 24705-81 [24]. При моделюванні гвинтової поверхні круглої різьби змінювались наступні параметри: - глибина профілю гвинтової поверхні ***t*** у межах від 0.5 до 1.0 мм, а крок гвинтової

поверхні ***p*** в межах від 1.0 до 4.0 мм. В таблиці 3.1 приведені значення основних параметрів гвинтової поверхні круглої різьби для кожного із випадків, для яких було виконано моделювання напружено-деформованого стану з'єднання.

Таблиця 3.1 – Основні параметри гвинтової поверхні різьби для кожного випадку моделювання

№	t (глибина профілю гвинтової поверхні)	p (крок гвинтової поверхні)
1	1	4
2	1	1
3	0.5	4
4	0.5	1
5	0,75	2,5

За допомогою графічного редактора SOLIDWORKS будуються 3D моделі гайки з армованого композиційного матеріалу з внутрішньою гвинтовою поверхнею і металевої вставки із зовнішньою гвинтовою поверхнею. Користуючись рекомендаціями вказаними в роботі Криворучко Д.В. [25], для зменшення часу розрахунків з 3D моделі був вирізаний окремий сегмент який і буде використовуватись в розрахунках. Також для більш точного аналізу і результатів завідомо задавався гарантований зазор розміром 0,05 мм між внутрішньою та зовнішньою гвинтовими поверхнями (рис.3.4).

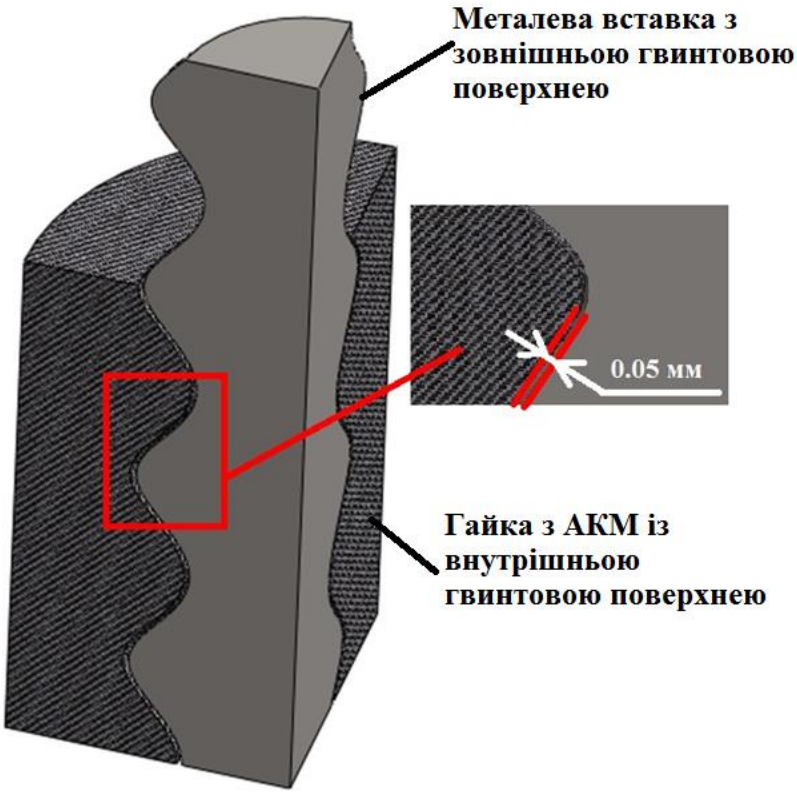


Рисунок 3.4 – 3D модель з’єднання в графічному редакторі SOLIDWORKS

Створення скінчено-елементної сітки, виконане також, засобами SOLIDWORKS: до складу SOLIDWORKS входить модуль скінчено-елементного аналізу COSMOSWORKS, який має вбудований генератор скінчено-елементної сітки. В нашому випадку використовувалися тетраедричні СЕ з 10 вузлами. Розмір скінчених елементів гайки з АКМ вибирався виходячи з того, щоб розрахунок займав прийнятний час. Розмір грані СЕ склав від 0,05 до 0,15 мм. В місцях контакту двох різьбових поверхонь розміри СЕ були зроблені меншими для отримання більш достовірних результатів.

Скінчено-елементна сітка металевої вставки була зроблена зі значно більших елементів, оскільки це вплине на час розрахунків, а напруження та деформації в ній будуть значно меншими ніж в деталі з АКМ. На рисунку 3.5 представлена СЕ сітка елементів запропонованого з’єднання.

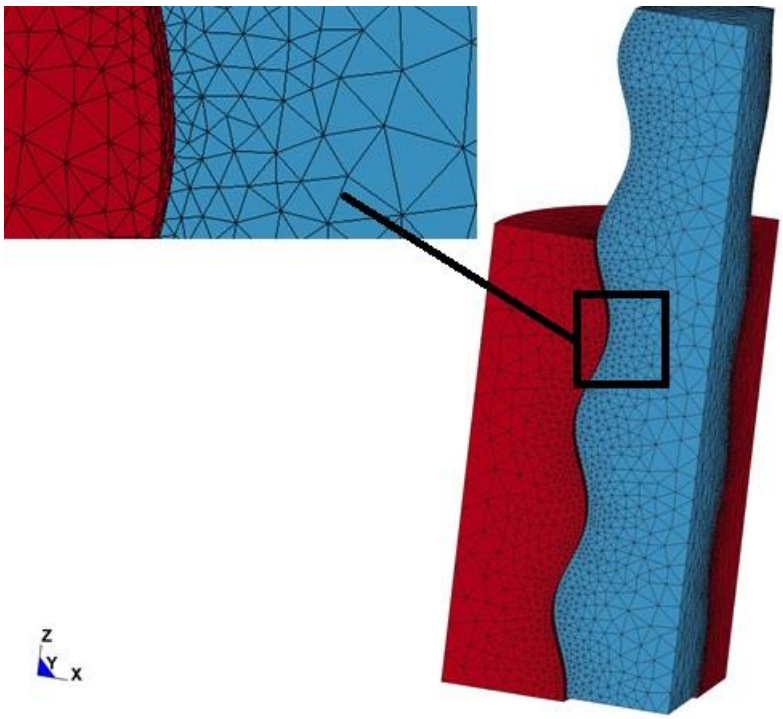


Рисунок 3.5 – Скінчено-елементна сітка моделей

Так як програмний модуль COSMOSWORKS не створює списку елементів моделі для командного файлу LS-DYNA, була написана керуюча програма на мові програмування Python для отримання списку елементів моделі з файлу середовища COSMOSWORKS. Механічні граничні умови задавалися жорстким закріпленням декількох границь гайки з АКМ. В даному випадку гайка була жорстко закріплена по зовнішній діаметральній поверхні (рис.3.6). Для вставки задаються обмеження переміщення вздовж осей ***X*** та ***Y***. Початкові умови для вставки задані поступальним переміщенням її вздовж осі ***Z.*** Механічні навантаження задаються переміщенням вставки згідно схеми закріплення вздовж її осі, з відповідною швидкістю.

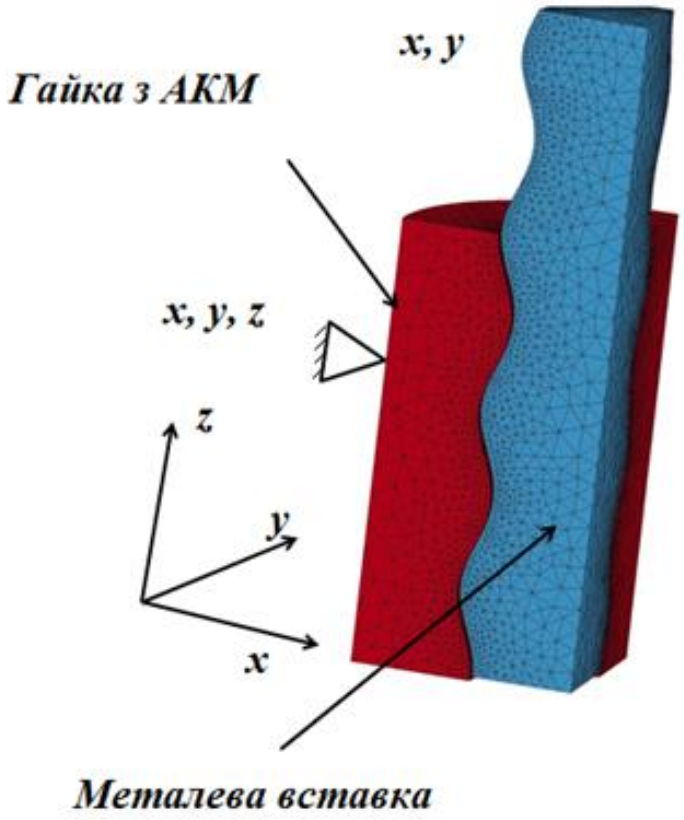


Рисунок 3.6 – Розрахункова схема та граничні умови моделі НДС з’єднання з армованих композиційних матеріалів

Для запуску розрахунку моделі завантажуються в систему скінченно-елементного аналізу LS-DYNA, далі система автоматично розпочинає розрахунок після активації клавіші “Run”. Завершивши розрахунок результати автоматично конвертуються для постпроцесора LS-PrePost-2.4 і зберігаються в обрану папку. Для параметрів розрахунку гвинтової поверхні з кроком *p=4мм* і глибиною профілю *t=1мм* постпроцесор будує графік залежності результуючої сили від часу (рис.3.7).

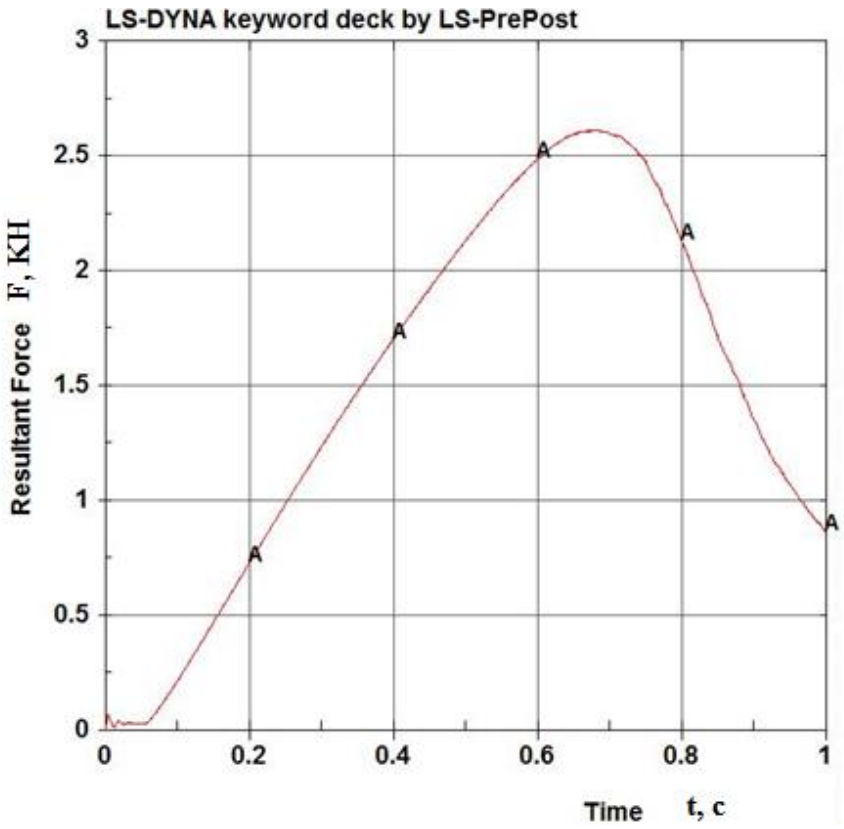


Рисунок 3.7 – Графік залежності результуючої сили від часу

Отримані результати свідчать про те що з’єднання між собою гвинтових поверхонь в двох різних матеріалах має досить високі показники міцності.

3.5 Висновок

1. Шляхом дослідження напружено деформованого стану з’єднання гвинтових поверхонь деталей з армованих композиційних матеріалів, для розрахунку був обраний метод скінченно-елементного аналізу.

2. Визначена система рівнянь для формулювання математичної моделі напружено-деформованого стану гвинтової поверхні.

3. Методом скінченно-елементного аналізу досліджено напружено-деформований стан з’єднання гвинтових поверхонь в двох різних матеріалах, один з яких виготовлено з армованого композиційного матеріалу, і виявлено що воно має досить високі показники міцності, в порівнянні з іншими способами.

РОЗДІЛ 4
РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ОБРОБКИ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

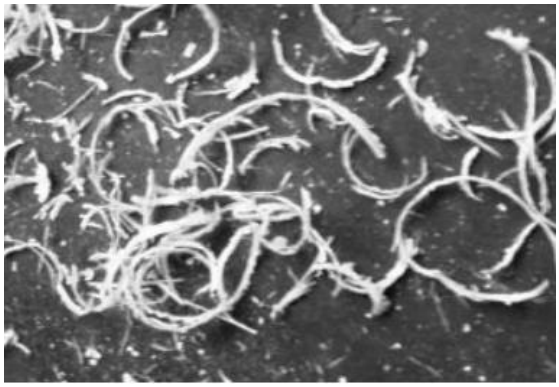
4.1 Фактори, що впливають на обробку

Основні причини труднощів при обробці деталей з армованого композиту пов'язані з його структурою та фізико-механічними властивостями. Розглянемо всі нюанси на прикладі формоутворення гвинтової поверхні в пластині композиту. В першу чергу формування отворів з подальшим формоутворенням в них гвинтової поверхні, а саме круглої внутрішньої різьби. Наявність скляних волокон в складі матеріалу пояснює інтенсивне зношення робочих поверхонь інструменту, що призводить до виникнення похибок лінійних розмірів отвору, який робиться в першу чергу перед нарізуванням гвинтової поверхні, в поздовжньому і поперечному січенні.

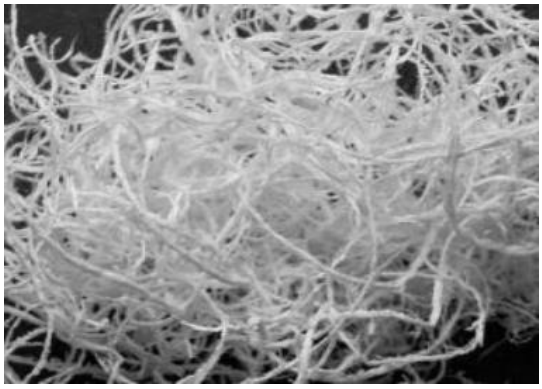
Крім того, через значні пружні деформації матеріалу заготовки відбувається усадка отвору після виведення з нього свердла. Це також призводить до виникнення похибок розміру і форми. Інтенсивне зношення ріжучих кромок інструменту є причиною зростання сил різання, що неминуче супроводжується підвищенням температури. Про що свідчать появи кольорів мінливості на ріжучих кромках. Внаслідок цього відбувається деструкція поверхневого шару заготовки, утворення мікротріщин, припалів.

Різні поєднання описаних вище чинників свідчать про те, що процес формування показників якості отворів в армованих композиційних матеріалах має досить складний, часто важкокерований характер. Необхідно відзначити, що процес свердління композиту має деякі особливості процесу стружкоформування. Як відомо, при обробці не крихких матеріалів в залежності від поєднання режимів різання, конструктивно-геометричних параметрів інструменту, фізико-механічних властивостей заготовки може утворюватися стружка трьох типів: зливна, сегментна та елементна. Однак, під час свердління композитних матеріалів, тим більше армованих, завжди

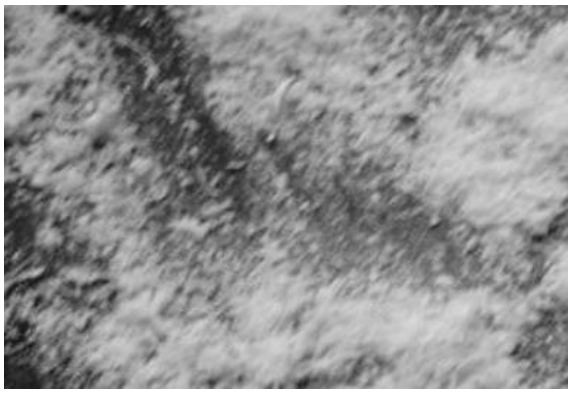
присутня, так звана, елементна (пилоподібна) стружка, яка може утворюватись як в поєднанні сегментної та зливної, так і окремо (рис. 4.1, а,б,в).



а)



б)



с)

Рисунок 4.1 – Види стружки (а – сегментна, б – зливна, с – елементна (пилоподібна))

Пилоподібна стружка – це суспензія дрібного пилу у вигляді летючих безбарвних кристалів, що складаються з частинок скла і затверділого сполучного, а також фенолосодержащего газу, що має характерний токсичний запах. Вплив пилоподібної стружки на оператора верстата приводить до виникнення професійних захворювань дихальних шляхів, шкірного покриву, викликає зниження його працездатності. У зв'язку з цим при призначенні режимів різання і вибору конструктивно геометричних параметрів інструменту

технолог повинен враховувати не тільки вимоги точності (розміру, форми) і шорсткості, але і об'єм утвореної пилоподібної стружки. Залежно від інтенсивності викидів підбирається пиле-стружкоприйомник відповідної

потужності. Виникнення елементної стружки призводить до швидкого залипання стружковивідних канавок осьового інструменту, що призводить до виходу його з ладу.

На сьогоднішній день мало досліджені залежності які зв'язують режими різання, геометричні параметри інструменту, з такими вихідними показниками операції свердління як точність розміру і форма отвору, його шорсткість, вид і обсяг стружки. Це призводить до того, що проектування технологічного процесу здійснюється на основі минулого досвіду,основуючись на методі проб і помилок. Трудомісткість технологічної підготовки значно збільшується, що призводить до зростання витрат на виготовлення продукції. У зв'язку з цим напрям на подальше вивчення процесу формування показників якості отворів в деталях із армованого композиційного матеріалу, є актуальними.

Дослідження проводилися на радіально свердлильному верстаті 2А55. Для експерименту була використана пластина виготовлена з використанням склотканини марки Т20 – 270 з розмірами решітки (0,5х0,5 мм) товщина тканини 0,2 мм, згідно ГОСТ 19170 – 2001, та епоксидної смоли марки EPOXY-520, розміри платини 190х107х16 мм. Отримання отворів здійснювалося спіральними свердлами діаметром 5 мм, заднім кутом $\alpha = 30°$, переднім кутом $\gamma = 15°$ і кутом при вершині $2\varphi = 120°$. Після свердління певного числа отворів вимірювалось зношення свердла шляхом вимірювання довжини ріжучої кромки (її зменшення після відпрацювання за однаковий проміжок часу).

Візуально з використанням збільшувальної лінзи проводився контроль утворення стружки і стану поверхні отвору на предмет припалення, утворення тріщин або розривів та ін. Наявність таких явищ на поверхні отвору свідчить про те, що обрані занадто високі режими різання. Тому для запобігання псуванню платини з композиту, експериментальним методом було вибрано діапазон режимів різання. Спочатку використовувалась мала подача (S = =0,15мм/об) і низька частота обертання (n = 64 об/хв), далі дані параметри поступово збільшувались, з умовою збереження продуктивності та якості обробки, до (S = 0,43 мм/об n = 530 об/хв) допоки отримувана в результаті

якість не стала гіршою. Допустимі параметри процесу свердління наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Параметри процесу свердління

Що контролюється	**Контрольовані параметри**	**Допустимі значення**
Отвір	Отвір ∅5 мм	18 мкм
	Шорсткість поверхні отвору Ra	6,3 мкм
	Відхилення від круглості	16 мкм
	Якість поверхні отвору	Мікротріщини
Стружка	Вид стужки	- Елементна (пилеподібна) - Сегментна - Зливна
Свердло	Зношення ріжучої кромки	0,7 мм
	Наявність кольорів мінливості	+/-

В результаті отриманих даних була складена таблиця залежності режимів різання від переважаючого виду стружки (таблиця 4.2). ЇЇ використання в подальшому зменшить витрату часу на підбір потрібних параметрів обробки отворів в композитах, задля запобіганню їх псуванню, а також пошкодженню самих заготовок із звичайних або армованих композитних матеріалів.

Обробка даного виду матеріалу є досить специфічною, через його структуру та різноманітність стружкового матеріалу отримуваного в процесі обробки. Саме тому дотримання необхідних режимів обробки та контролювання процесу формування стружки є досить важливим показником для забезпечення мінімального пливу на робітника та навколишнє середовище шкідливих виробничих факторів.

Таблиця 4.2 – Залежність виду стружки від режимів різання

<table>
<tr><td>Оберти
(об/хв)</td><td rowspan="6">Пилеподібна</td><td rowspan="3">Пилеподібна</td><td rowspan="3">Елементна
+
пилеподібна</td><td rowspan="3">Поява припалів</td></tr>
<tr><td>500</td></tr>
<tr><td>450</td></tr>
<tr><td>400</td><td rowspan="3">Пилеподібна
+
елементна</td><td rowspan="3">Елементна</td><td rowspan="2">Сег-
ментна</td><td rowspan="2">Еле-
ментна</td></tr>
<tr><td>350</td></tr>
<tr><td>300</td></tr>
<tr><td>250</td><td rowspan="5">Пилеподібна
+ елементна</td><td rowspan="3">Сегменна</td><td rowspan="3" colspan="2">Зливна</td></tr>
<tr><td>200</td></tr>
<tr><td>150</td></tr>
<tr><td>100</td><td rowspan="2">Зливна</td><td rowspan="2" colspan="2"></td></tr>
<tr><td>50</td><td colspan="2">Поява тріщин</td></tr>
<tr><td>0</td><td>0,1</td><td>0,15</td><td>0,20</td><td>0,25</td><td>0,30</td><td>0,35</td><td>0,40</td><td>0,45</td><td>Подача
(мм/об)</td></tr>
</table>

До інструменту для обробки деталей з вуглепластиків, склопластиків, стільникових і трубчастих конструкцій пред'являються високі специфічні вимоги. Проблеми, характерні для обробки деталей з АКМ: розшарування деталей, перегрів, поява розривів, абразивний знос ріжучого інструменту. Властивості полімерних матриць практично не впливають на вибір ріжучого інструменту. Процес різання матриці характеризується низьким модулем пружності, малою міцністю, високим відносним подовженням при розриві і, що найважливіше, низькою термостійкістю полімерів. Остання істотно обмежує допустиму продуктивність різання всього композиційного матеріалу з полімерним сполучною.

Беручи до уваги, що розплавлений матеріал матриці може налипати на ріжучу кромку інструменту і як наслідок погіршувати відведення теплоти і підвищувати швидкість зносу інструменту. При підборі оптимального різального інструменту основне значення має вид наповнювача полімерного

композиційного матеріалу. Для вуглепластиків і склопластиків рекомендується використовувати ріжучий інструмент, виготовлений із застосуванням вольфрамокобальтових сплавів, аналогічних покриттів і ріжучий інструмент із застосуванням алмазів (рис.4.2)

Рисунок4.2 – Приклади ріжучого інструменту, виготовленого із застосуванням алмазів

При механічній обробці стільникових армованих композитних матеріалів основна складність полягає в тому, що даний матеріал є неоднорідним за своєю структурою (одночасно присутні вертикально і горизонтально розташовані шари матеріалів). При фрезеруванні, на приклад, наявності підвищеного навантаження може призвести до зминання тонкостінних стільників.

Іншим обмежувальним фактором, згаданим раніше, є тепло, що виділяється в процесі обробки. Підвищені температури в зоні різання можуть призвести до руйнування клейового з'єднання або композитних листів обшивки. Тому для обробки такого матеріалу методом фрезерування накраще підходять багатозубі кінцеві фрези, розроблені саме для обробки стільникових матеріалів (рис.4.3). Їх конструкція із спеціальними стружколамаючими канавками та гостро заточеними зубами забезпечує акуратний і рівний різ, практично не деформуючи стільниковий серцевину.

Рисунок 4.3 – Твердосплавна кінцева фреза фірми GARANT

4.2 Процес формоутворення гвинтової поверхні в АКМ

Для нарізування гвинтової поверхні в армованому склопластиковому матеріалі запропонованою технологією, був виготовлений різець, який має гострий кут заточування [26]. На початку проведення експериментального освоєння даної технології обробки [27], в якості інструментального матеріалу була використана швидкорізальна сталь Р6М5, вибір даного інструментального матеріалу був зумовлений частим використанням його в промисловості, та досить не високою ціною. Але після формоутворення перших різьбових поверхонь, було виявлено що вже після нарізання гвинтової поверхні в першому отворі, інструмент отримував значне зношування і потребував подальшого заточування. Саме через причини швидкого зношення, для подальших експериментів було вирішено застосовувати в якості інструментального матеріалу твердий сплав.

Різець був виготовлений з особливо малозернистого твердого сплаву K55SF виробник фірма Guhring (Німеччина). Основні властивості даного інструментального матеріалу зазначені виробником приведені в таблиці 4.3 Ріжучий інструмент виготовлявся методом ручної заточки з твердосплавного циліндра діаметром 6 мм довжиною 35мм. На рисунку 4.4 представлений ескіз даного інструмента з вказаними основними геометричними параметрами.

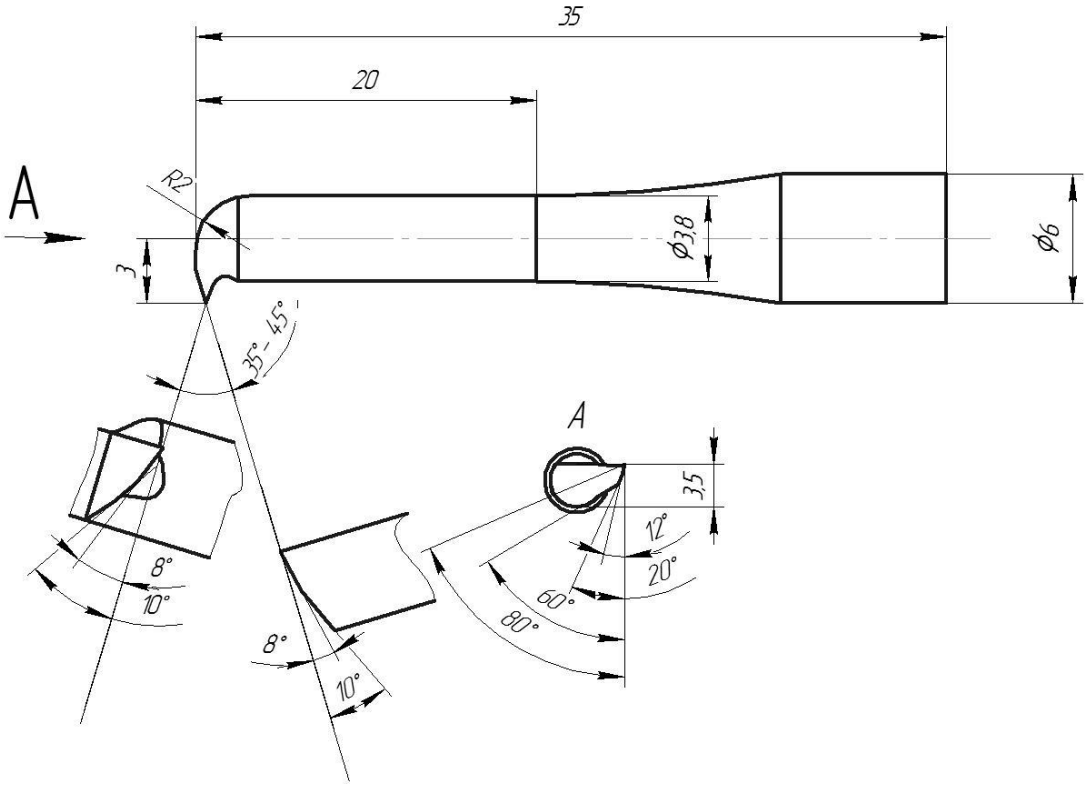


Рисунок 4.4 – Ескіз виготовленого різця

Таблиця 4.3 – Основні властивості інструментального матеріалу різця[28]

Марка сплаву	Вміст кобальту Co[M -%]	Розмір зерна [мкм]	Твердість [HV]	Класифікація ISO [ISO 513]
K 55 SF	9	0,2 – 0,5	1920	K10 – K30

На рисунку 4.5а представлене фото різця, який кріпиться в спеціальній втулці, а на рисунку 4.5б 3D модель різця виконана в середовищі SolidWorks.

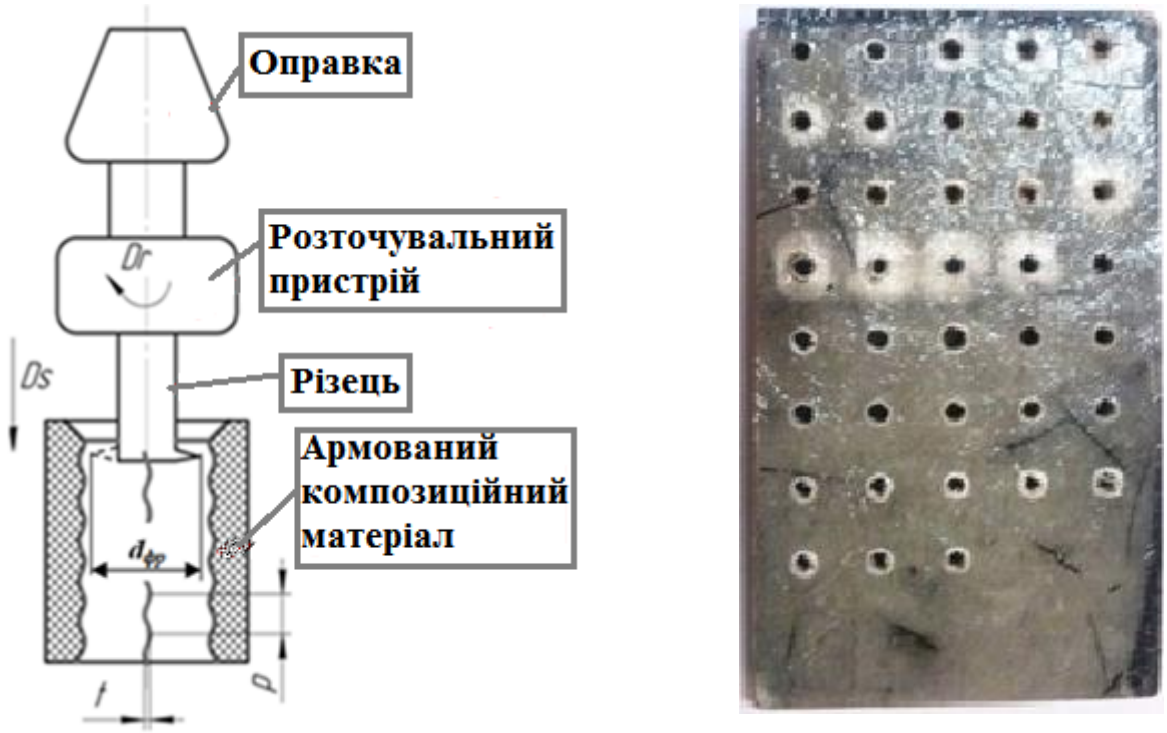
а) б)

Рисунок 4.5 – Різець для обробки круглої різьби

Для виконання формоутворення гвинтової поверхні представленим методом [27], його необхідно було адаптувати конкретно для даного випадку. Для цього додатково в систему обробки потрібно ввести розточувальний пристрій, який допоможе реалізувати процес нарізування гвинтової поверхні в армованому склопластиковому матеріалі запропонованою технологією. Даний розточувальний пристрій представлений на рисунку 4.6.

Після отримання всіх елементів системи різання для проведення процесу формоутворення різанням круглої гвинтової поверхні, та визначення всіх конструктивних параметрів для обробки, було успішно виготовлено гвинтову поверхню (круглу різьбу) в армованій склопластиковій пластині запропонованою технологією.

Схема формоутворення круглої різьби в склопластиковому армованому матеріалі представлена на рисунку 4.6а. Згідно представленої схеми армований матеріал обробляється різцем, закріпленим в розточувальному пристрої, який встановлюється в оправці фрезерного верстата з ЧПК моделі 6Р13Ф3. На рисунку 4.6б представлене фото процесу.



а) б)

Рисунок 4.6 – Формоутворення круглої різьби в АКМ:
а – спрощена схема формоутворення; б – фото деталі

Реалізація процесу формоутворення круглої різьбової поверхні методом огинання [27] відбувалася на фрезерному верстаті з ЧПК моделі 6Р13Ф3, для якого була написана спеціальна керуюча програма для обробки гвинтової поверхні. Режими різання були наступними: частота обертання шпинделя n= 2000 об/хв; подача S_o= 0,1 мм/об. Оскільки експериментальним шляхом було встановлено що саме при даних значеннях, стійкість інструмента найбільша, що визначалося кількістю формоутворених гвинтових поверхонь, за один цикл без переточування інструмента.

Спрощена кінематика процесу формоутворення різьби в АКМ виглядає наступним чином, різальному інструменту надають прямолінійний рух уздовж осі заготовки, як ріжучий інструмент використовують різець з гострим кутом заточування (рис.4.5), а діаметр $\boldsymbol{d_p}$, рівний сумі внутрішнього діаметра $\boldsymbol{D_1}$ різьби, та глибині профілю різьби $\boldsymbol{t}$, встановлюють за рахунок розточувального пристрою (показаний на рисунку 4.6), при цьому різцю надають обертання щодо власної осі і додатково повідомляють коловий рух навколо осі заготовки,

який узгоджений з прямолінійним рухом різця таким чином, що за один коловий рух, різцю повідомляють прямолінійний рух уздовж осі заготовки, величина якого дорівнює кроку ***p*** гвинтової поверхні, причому діаметр колового руху дорівнює глибині профілю гвинтової поверхні ***t***, крім того вісь заготовки розташовують паралельно по відношенню до осі обертання інструменту.

Величина діаметра d_p, різця (рис.4.5а) для обробки круглої різьби визначається за формулою 4.1:

$$d_{\text{р.}} = D_1 + t \qquad (4.1)$$

де D_1 – внутрішній діаметр різьби, мм;

t – глибина профілю різьби, мм.

Обробка круглої гвинтової поверхні виконується з однієї установки заготовки, фаску не потрібно виконувати. Для даного способу не обов'язковим є також виконання канавки для виходу різця .

Для перевірки на практиці, запропонованої технології формоутворення різанням роз’ємного різьбового з’єднання в деталях АКМ, було виконано декілька пробних експериментів. Виготовлялася кругла різьба з основними параметрами ***p=4мм***, і ***t=1 мм***, дана різьба нарізувалася на діаметрі 5 мм, згідно технології описаній вище. Дані експерименти дозволили встановити можливість виготовлення вказаної різьби даною технологією, для проведення подальших розрахунків.

4.3 Висновок

1. При фрезеруванні композиційних полімерних матеріалів характерне зношення ріжучого інструменту по задній поверхні з утворенням фаски. Зі збільшенням швидкості різання інтенсивність росту фаски зношення істотно зростає, тому при призначенні режимів різання слід керуватися раціональним поєднанням працездатності різального інструменту, якості обробленої поверхні та продуктивності обробки.

2. Конструкція ріжучого інструменту повинна мати високу міцність, твердість і зносостійкість ріжучої частини. Її геометрію рекомендується формувати з збільшеними кутами різання для забезпечення якості обробленої поверхні.

3. При формуванні ріжучої частини інструменту виникають проблеми з якістю утворених поверхонь і утворенням дефектів на ріжучій кромці. Загострювання різального інструменту рекомендується проводити електроалмазним способом з одночасною електрохімічною правкою шліфувального круга на металевій зв'язці і травленням оброблюваної поверхні.

РОЗДІЛ 5
ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих факторів на механічній дільниці, розробка заходів по їх усуненню

У розділі наведено аналіз умов праці верстатної зали кафедри ТМВІ в Сумському державному університеті, де виготовляються деталі з армованих композиційних матеріалів.

Технологічний процес обробки деталі здійснюється на дільниці, розміщеній у верстатній залі, рисунок 5.1.

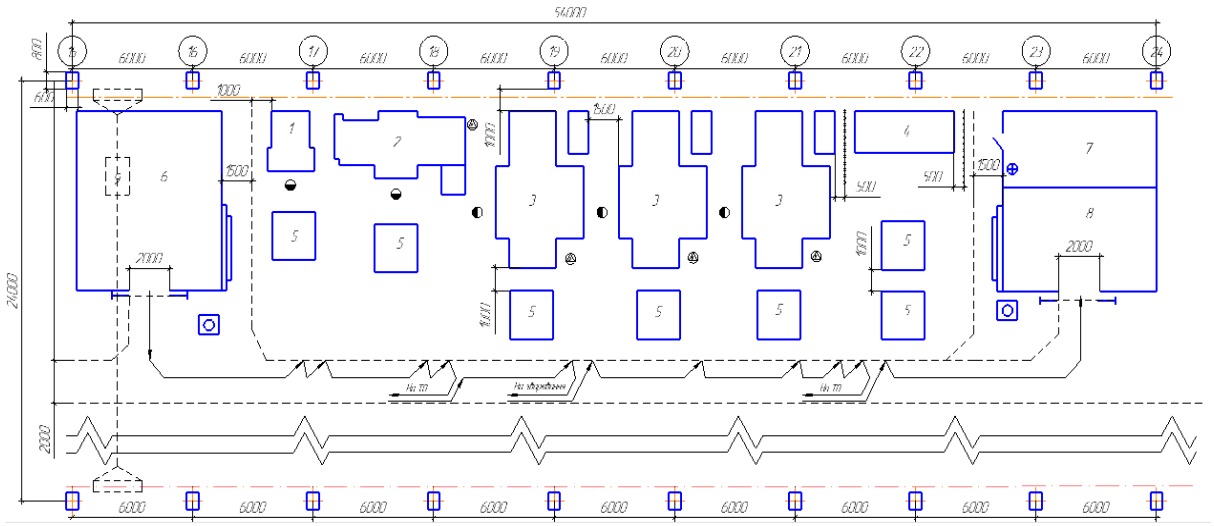


Рисунок 2.1 – План дільниці

У технологічному процесі обробки деталей задіяні наступні верстати та обладнання:

- свердлильні верстати;
- токарні верстати з ЧПК;
- фрезерні верстати з ЧПК.

Мікроклімат у виробничих приміщеннях, головним чином, визначається температурою, відносною вологістю повітря робочої зони, швидкістю руху повітря на ділянці і т.д. Значення нормативних параметрів мікроклімату визначаються відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 (див. таблицю 5.1).

Таблиця 5.1 - Мікроклімат на ділянці виготовлення деталі

Параметр	Період часу	Фактична величина	Нормативна величина
Температура, °С	Теплий період	20	20…25
	Холодний період	18	17…23
Відносна вологість, %	Теплий період	55…65	40…60 (допускається 75)
	Холодний період	35…45	40…60 (допускається 75)
Швидкість руху повітря, м/с	Теплий період	0,4…0,7	0,6…1,0
	Холодний період	0,3…0,4	0,2…0,4
Інтенсивність теплового опромінення (при), Вт/м2	-	62	не більше 70
Температура огороджувальних конструкцій (стіни, підлоги, стелі), а також технологічного обладнання або огороджувальних приладів, °С	-	41	не більше 45

Освітлення виробничого приміщення здійснюється природним і штучним світлом, відповідаючи вимогам ДБН В2.5-28-2006. Природне освітлення проводиться за комбінованою схемою: через світлові прорізи в бічних стінах і в світлових ліхтарях. Загальне штучне освітлення здійснюється світильниками з лампами денного світла, застосування яких дозволено діючим стандартом. На даний час існує велика кількість сучасних економічних світильників. Для

місцевого освітлення застосовуються світильники, встановлені безпосередньо на робочому місці, типу прожектор. На робочому місці оператора верстата повинно бути забезпечено освітленість робочої зони не менше як 150-200 Лк. Робоче місце столу ВТК повинно мати освітлення не менше 200 Лк.

Для вентиляції повітря використовується загальнообмінна припливно-витяжна вентиляція, яка дозволяє забезпечити оптимальні кліматичні умови роботи на ділянці, використання вентиляційних шахт, вентилятори, місцеві відсмоктувачі за вимогами до ДБН Д.2.6-3-2000 забезпечуючи швидкість руху повітря не більше 0,3 м/с. Для опалення приміщення використовується водяна система з опалювальними панелями і автоматичним регулюванням у поєднанні з системою кондиціонування повітря.

На ділянці використовується трифазна електрична мережа змінного струму з частотою 50 Гц. Номінальна напруга в мережі силових машин – 380В, а для харчування робітників та освітлення – 220 В. Використовуються заходи по електробезпеці робітників, захисне заземлення, занулення і т.д. При механічній обробці для охолодження застосовуємо мастильно-охолоджуючу рідину (МОР) на основі емульсорів. В якості МОР при обробці заготовок на ділянці використовується 5% розчин «ЕкоЕМ» (ТУ 38.10 / 932-82). До складу МОР входить емульсія ЕТ-1, кальцинована сода, нітрид натрію, як антикорозійна присадка, і вода з додаванням мінеральних масел та інгібіторів корозії. Дана МОР має малу токсичність, не володіє дратівливою дією і не є активним джерелом забруднення повітря. МОР відноситься до 4-го класу небезпеки.

Як ріжучий інструмент використовуються різці, свердла, зенковки, мітчики, шліфувальні круги котрі є покупними та відповідають діючим вимогам сертифікованого завода-виробника.

Для установки пристосувань, заготовок на верстат застосовується кран балка. Маса пристосування на операції до 150 кг. На контрольної операції використовується спеціальне пристосування масою 100 кг встановлення якого також здійснюється за допомогою кран-балки.

При механічній обробці деталей на робочих місцях задовольняються умови праці та вимоги до обладнання відповідно до санітарних

норм ДСН 3.3.6.037-99.

На чорнових операціях при обробці утворюється пил з розмірами частинок від 2 до 60 мкм. Виконувані робітниками на ділянці операції відносяться до робіт середньої тяжкості, 2б клас (витрати 150-200 ккал/год). Категорія зорових робіт по ДБН В2.5-28-2006 від малої, середньої точності на чорнових операціях, до високої точності на чистових і контрольних операціях.

Загальна вібрація машин та верстатів відповідає ДСН 3.3.6.039-99 повинна становити не більше 120 дБ. Вібровимірювальна апаратура повинна відповідати вимогам даного стандарту.

Згідно ГОСТ 12.0.003-2015 аналіз ділянки дає можливість виявити такі потенційні небезпеки і шкідливість:

а) відбуваються шкідливі виділення парів і аерозолів при використанні мастильно-охолоджуючої рідини (МОР). Зниження концентрації пилу, парів МОР і аерозолів в повітрі до гранично допустимого рівня забезпечуємо за рахунок вентиляційної системи ГОСТ 21.602-2016;

б) виникає підвищений рівень шуму при одночасній роботі верстатів, особливо зношеним інструментом. Для зниження сумарного рівня шуму передбачаємо звукопоглинальні перегородки і облицювання стін по ДСН 3.3.6.037-99;

в) несприятливі мікрокліматичні умови для роботи робочих. Згідно з ДСН 3.3.6.042-99 передбачаємо вимоги для нормальної роботи, які необхідно виконувати.

г) можливість розгерметизації пневмоприводів, внаслідок чого можливий виліт заготовки з затискного пристрою. У пристроях з пневмоприводом встановлюємо зворотні клапани, що забезпечують усунення витоку повітря з пневмоприводів у випадках зниження тиску в системі,

згідно з ГОСТ 12.2.029-88;

д) можливість контакту з рухомим внутрішньоцеховим транспортом: електрокарами і т.п. Внутрішньоцеховий транспорт відповідно до ГОСТ

12.2.003-91 обладнуємо звуковою сигналізацією, рухомі частини офарблюємо в червоний колір, поблизу небезпечних зон на видних місцях наносимо попереджувальний знак згідно з ГОСТ 12.4.026-2015;

е) небезпека контакту з рухомим і обертовим інструментом і робочими органами верстатів. Для запобігання небезпечного зіткнення робітника з рухомими і обертовими органами верстатів і інструментами передбачаємо установку захисних пристроїв згідно ГОСТ Р 54431-2011;

є) небезпека ураження електричним струмом при переході напруги на металеві неструмопровідні частини обладнання. Для запобігання ураження електричним струмом (відповідно до вимог ГОСТ Р 12.1.019-2009) виконаємо захисне заземлення металевих неструмопровідних частин обладнання, які можуть опинитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції згідно ДСТУ Б В.2.5-82:2016;

ж) можливість контакту з вантажопідйомними механізмами, зокрема, кран-балками. Внутрішньо цеховий транспорт відповідно до ГОСТ 12.2.003-91 обладнується звуковою сигналізацією, рухомі частини фарбується в кольори, поблизу небезпечних зон на видних місцях наносимо попереджувальний знак згідно з ГОСТ 12.4.026-2015;

з) виникають вібрації при роботі обладнання. Згідно ДСТУ 2867-94 передбачаємо вимоги, що стосуються охорони праці для нормальної роботи на механічній дільниці, які необхідно підтримувати і виконувати;

и) можливість виникнення пожежі, протипожежні заходи які повинні виконувати згідно з НАПБ А.01.001-2014;

і) небезпека контакту з відлітаючої стружкою. Для захисту від стружки застосовуємо захисні екрани на верстатах згідно ГОСТ 12.3.002-2014;

Оцінка відповідності використовуваного на ділянці обладнання та робочих місць вимогам безпеки приведена в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Оцінка відповідності обладнання, робочих місць вимогам безпеки

Зміст вимог нормативного документа	Нормативний документ	Відповідність процесу, обладнанню, робочого місця	
		так	ні
1.Станок, що знаходиться на ділянці зобов'язаний мати захисні пристрої, які виключають його в процесі роботи при:	ГОСТ 12.2.009-99		
- дотику працюючого з колючими і ріжучими інструментами, а також елементами частин верстата		+	
- викиді ріжучого інструменту або його елементів із зони різання			-
- викиді заготовок, стружки і МОР із зони обробки		+	
- можливості виходу за встановлені межі рухомих частин верстата			-
2. Режими технологічного процесу обробки заготовки повинні забезпечити:	ГОСТ 12.3.002-2014		
- установку і зняття заготовок поза зоною обробки		+	
- установку переносних огороджень, знаків небезпеки при виході габаритів заготівлі за кордон обладнання		+	

Продовження таблиці 5.2

- попередження зіткнення рук верстатника з рухомими пристроями і ріжучим інструментом		+	
- прибирання стружки з робочого місця механізованим способом, який виключає пилоутворення			-
- контроль розмірів заготовок, які обробляються в автоматичному режимі, без зняття деталі з верстата			-
- контроль розмірів заготовок і їх зняття для контролю з верстата при виключених механізмах обертання заготовки або руху		+	

На механічній дільниці по виготовленню деталі необхідно дотримуватися заходів пожежної безпеки, згідно з ГОСТ 12.1.004-91.

У цеху відповідними наказами, розпорядженнями встановлюється порядок проведення протипожежного інструктажу та занять із пожежно-технічного мінімуму з робітниками.

Всі робітики проходять первинний і повторний протипожежний інструктаж. Первинний протипожежний інструктаж в обов'язковому порядку проходять всі новоприбулі на роботу. Його найчастіше поєднують з інструктажем по охороні праці.

Повторний інструктаж проводять на робочому місці, причому робітник має бути ознайомлений:

– з інструкцією про заходи пожежної безпеки на даній ділянці і в цеху;

– з місцями розташування первинних і стаціонарних засобів пожежогасіння і правилами їх вживання при пожежі, а так само з місцями розташування телефонів і пожежної сигналізації, у тому числі і із запасними виходами;

– з порядком дій при пожежі або загорянні.

Повторний протипожежний інструктаж в обов'язковому порядку проводять з верстатниками, яких переводять з однієї ділянки на іншій, якщо пожежна небезпека на них різна.

За пожежною небезпекою приміщення проектованої ділянки відноситься до категорії «Д», тобто в приміщенні використовуються негорючі речовини і матеріали в холодному стані (цехи холодної обробки матеріалів). Протипожежні системи встановлено за вимогами ДБН В.2.5-56:2010.

Виходячи з категорії пожежонебезпеки ділянки Д, застосовуємо вуглекислотний вогнегасник ОУ-5 з об'ємом балона в 5 л. З розрахунку площі, яка захищається спроектованої ділянки до 600 м^2, приймаємо кількість вогнегасників - 1 (один).

Вогнегасним засобом вогнегасника ОУ-5 є зріджений вуглекислий газ, тому він призначається для гасіння різноманітних пожеж (крім лужних матеріалів і тих речовин, які горять без повітря). Даний вогнегасник придатний для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою до 1000 В і може бути використаний при температурах навколишнього повітря від -25° С до +50°С.

Водяне опалення на ділянці повинно відповідати основним вимогам пожежної безпеки до систем опалення, передбаченим. При водяному опаленні перевагу необхідно віддавати нагрівальним приладам з гладкими поверхнями, так як на них менше осідає пилу і її легше видаляти.

У технологічних процесах, що супроводжуються тертям, подрібненням і так далі, на самих матеріалах і на обладнанні утворюється електричний потенціал, вимірюваний тисячами і десятками тисяч вольт.

Електризація твердих тіл посилюється в процесі тертя, так як при цьому розширюються зони зіткнення тіл і виділяється теплота, яка змінює енергетичний стан атомів взаємодіючих поверхонь. Наприклад, при терті гумової стрічки транспортера по роликам, а також при прослизанні трансмісійних ременів відносно шківів, виникають електричні потенціали, що

досягають 40 кВ і більше. Статична електрика на виробництві може викликати пожежі і вибухи.

Імовірність їх виникнення залежить від концентрації горючої суміші і запалюючої здатності електричних розрядів.

Запалюючу здатність розрядів визначають експериментально шляхом порівняння максимально можливого заряду в імпульсі q_{max}, що виникає з імовірністю не більше 10^{-6}, з допустимим значенням заряду $q_д$. Гранично допустима напруженість $E_д$ на робочих місцях не повинна перевищувати

60 кВ/м при впливі до 1 години. Зменшення сили тертя і площі контакту, шорсткості взаємодіючих поверхонь, їх хромування або нікелювання знижують величину електростатичних розрядів. Цьому ж сприяє створення повітряної подушки між рухомим матеріалом і елементами обладнання.

Таким чином, в першу чергу, щоб уникнути дії на людину статичної електрики, і для запобігання замикання через тіло людини електричного кола з підвищеним значенням напруги передбачаємо такі заходи:

а) підключення виробничого обладнання до заземлювального пристрою;

б) на кожному робочому місці, біля верстата повинні бути дерев'яні трапи, на всю довжину робочої зони з шириною не менше 0,6 м від виступаючих частин верстата;

в) наявність заземлення або посиленої ізоляції з пробивною напругою не менше 4000 В.

Крім цього, необхідно передбачати застосування засобів індивідуального захисту, зокрема, гумові калоші, килимки ДСТУ 7239:2011.

Крім перерахованих заходів, важливу роль в пожежній безпеці грають первинні засоби пожежогасіння, які служать для гасіння пожеж в початковій стадії їх розвитку до прибуття пожежних підрозділів. До них відносяться ручні вогнегасники, ящики з піском, укомплектовані совковими лопатами, азбестові, грубошерстні полотна, з розмірами не менше 1×1 м, ломи, сокири.

На ділянці необхідно мати зв'язок пожежної охорони для швидкого і точного сповіщення при пожежі, аварії, стихійних лихах, своєчасного виклику необхідних сил і засобів для ліквідації пожежі, аварії, стихійного лиха.

На промислових підприємствах організовуються центральні пункти пожежного зв'язку (ЦППЗ), що забезпечують як телефонний, так і радіозв'язок.

План евакуації дільниці зображено на рисунку 5.2.

Рисунок 5.2 – План евакуації при пожежі на дільниці

5.2 Розрахунок заземлення ділянки верстатної зали

Необхідно розрахувати заземлення ділянки верстатної зали кафедри ТМВІ в Сумському державному університеті.

Заземлювачі заглиблені і розміщені в один ряд (глибина закладання t=100 см). Тип заземлювача – стрижень. Довжина заземлювача – 300 см. Діаметр заземлювача – 6 см. Ширина поєднуючої смуги – 7 см. Грунт – чорнозем. Кліматична зона – III.

Відстань між заземлювачами з співвідношення c, для занурених стаціонарних заземлювачів. Це відношення приймаємо c=1, тоді

$$L_{ст}=c \bullet l_{ст}, \qquad (5.1)$$

$L_{ст}$=1•300=300 см.

Згідно з ПЕУ, ПТБ та ПТЕ припустимий опір захисного заземлення для сеті до 1000 В з ізольованою та наглухо заземленою нейтралью Rз= 4 Ом.

Розрахунковий питомий опір ґрунту для стрижнів та з'єднувальної смуги з урахуванням збільшуючого коефіцієнта знаходиться

$$\rho_{р.} = \rho_{т} \cdot k \qquad (5.2)$$

ρ=50 Ом•м =0,5•104 Ом•см – питомий опір грунту.

Збільшуючі коефіцієнти для стрижня та смуги ураховують зміни опору грунту в різні пори року в залежності від опадів, приймаємо для стрижня – k=1,4, для смуги - k=5.

Розрахунковий питомий опір ґрунту для стрижнів знаходимо за формулою:

ρ=0,5•104•1,4=0,7•104 Ом•см.

Розрахунковий питомий опір ґрунту для смуги знаходимо за формулою:

ρ =0,5•104•5=2,5•104 Ом•см.

Визначаємо опір розтікання струму одиночного заземлення, який знаходиться на відстані 100 см,

$$R_{ст}= 0{,}366 \cdot \frac{\rho_{р.ст.}}{l_{ст}} \left(\lg \frac{2l_{ст}}{d_{ст}} + \frac{l}{2} \lg \frac{4t + l_{ст}}{4t - l_{ст}}\right) \qquad (5.3)$$

де t – відстань від поверхні до середини стрижня, см.

$$t = h_d + \frac{l_{сп}}{2} \quad (5.4)$$

$h_в$ = 100 см – глибина закладання;

$l_{ст}$ =300 см – довжина стержнів, тоді

$$t=100+300/2=250 \text{ см}$$

Визначаємо опір розтікання струму одиночного заземлення по формулі

$$R_{ст} = 0{,}366\frac{0{,}7}{300}\left(lg\frac{2\cdot300}{6} + 0{,}5lg\frac{4\cdot250+300}{4\cdot250-300}\right)10^4 = 18{,}2 \text{ Ом}$$

Визначаємо приблизну кількість заземлювачів,

$$n_1 = Rст/R3, \quad (5.5)$$

n_1=18,2/4=4,55, приймаємо 5 штук,

Знаходимо коефіцієнт екранування стрижнів з урахуванням приблизної їх кількості та відношення $c=1-\eta_в=0{,}85$.

Необхідна кількість стрижнів з урахуванням коефіцієнта екранування:

$$n_{ст} = \frac{18{,}2}{4\cdot0{,}85} = 5{,}3, \text{ приймаємо 5 штук.}$$

Розрахунковий опір розтікання струму в стрижнях при прийнятій кількості стрижнів,

$$R_{ст} = \frac{R_{ст}}{n_{ст}\cdot\eta_e} \quad (5.6)$$

$$R_{\text{ст}} = \frac{18,2}{5 \cdot 0,85} = 4,28 \text{ Ом}$$

Знаходимо довжину з'єднувальної смуги,

$$L_{\text{см}}=1,05L_{\text{см}}(n_{\text{ст}}-1), \quad (5.7)$$

$$L_{\text{см}}=1,05 \bullet 300(5-1)=1260 \text{ см}.$$

Знайдемо опір розтікання в з'єднувальній смузі

$$R_{\text{см}}= 0,366 \cdot \frac{\rho_{р.см.}}{L_{\text{см}}} \lg \frac{2L_{\text{см}}}{h \cdot b} \quad (5.8)$$

$$.R_{\text{ст}} = 0,366 \cdot \frac{0,7}{1260} 10^4 \cdot lg \frac{2 \cdot 1260^2}{100 \cdot 5} = 24,9 \text{ Ом}$$

Знаходимо коефіцієнт екранування смуги з урахуванням кількості заземлювачів та відношення с=1-$\eta_в$ =0,77 [таблиця 40].

Розрахунковий опір розтікання струму в смузі,

$$R_{\text{см}}= \frac{R_{\text{см}}}{n_{\text{см}} \cdot \eta_e} \quad (5.9)$$

$$R_{\text{ст}} = \frac{24,9}{1 \cdot 0,77} = 32,3 \text{ Ом}.$$

Знаходимо загальній розрахунковий опір заземлення в стрижнях та смузі

$$R_{\text{з.р.}}= \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{р.ст}}} + \frac{1}{R_{\text{р.см}}}} \quad (5.10)$$

$$R_{\text{з.р.}} = \frac{1}{\frac{1}{4,28}+\frac{1}{32,3}} = 3,7 \text{ Ом.}$$

5.3 Висновок

Зрівнюючи $R_з$ та $R_{з.р}$ можемо стверджувати, що використання запропонованої системи заземлення ділянки верстатної зали кафедри ТМВІ

в Сумському державному університеті буде ефективна, так як 4 Ом>3,7 Ом.

ВИСНОВКИ

Проаналізувавши існуючі методи з’єднання деталей виготовлених з армованих композиційних матеріалів із іншими матеріалами виведено ряд залежностей та рекомендацій щодо механічної обробки гвинтових поверхонь в деталях з АКМ, зокрема:

а) досліджено вплив деформацій які виникають при механічній обробці на стан отриманої поверхні, її якість і точність; виявлено, що збільшення глибини різання веде за собою збільшення впливу деформацій на деталь, які характеризуються появою мікротріщин, припалів, пошкодженням армованих волокон та ін.; розроблені рекомендації щодо покращення даних показників шляхом вибору необхідних режимів різання та специфічних параметрів обробки;

б) за допомогою математичного аналізу розраховані залежності міцності гвинтових поверхонь в деталях з армованих композиційних матеріалів від виду їх армуючих елементів та способів обробки; виявлено що схема армування перехрещення волокон під кутами 0°,45°,90° є найбільш ефективною, з урахуванням показників міцності;

в) в розділі з охорони праці досліджено потенційний вплив шкідливих факторів на працівників та навколишнє середовище при обробці композиційних матеріалів, а також розраховано заземлення ділянки верстатної зали.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Карпинос Д. М. Новые композиционные материалы / Карпинос Д. М., Тучинский Л. И., Вишняков Л. Р. – К. : Вищашкола, 1977. – 312 с.

2. Proctor B. A. Composite materials; 1990 [cited 15 April 2014]. Available from:http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/Inspirational/resources/4.3.1.pdf.

3. Pramanik A. Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites. Int J Mach Tools Manuf 2014;86: 44–61.

4. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Книга 2. (Handbook of composites) Справочное издание. Под редакцией Дж. Любина. Перевод с английского А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта. Под редакцией Б.Э. Геллера. (Москва: Издательство «Машиностроение», 1988).

5. Groche P et al. Joining by forming—a review on joint mechanisms, applications and future trends. J Mater Process Technol 2014;214

6. Möller F et al. Novel method for joining CFRP to aluminium. Phys Procedia 2010;5:37–45.

7. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Книга 2. (Handbook of composites) Справочное издание. Под редакцией Дж. Любина. Перевод с английского А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта. Под редакцией Б.Э. Геллера. (Москва: Издательство «Машиностроение», 1988).

8. De Morais AB et al. Strength of epoxy adhesive-bonded stainless-steel joints. Int J Adhes Adhes 2007;27(8):679–86

9. Rudawska A. Adhesive joint strength of hybrid assemblies: titanium sheetcomposites and aluminium sheet-composites—experimental and numerical verification. Int J Adhes Adhes 2010;30(7):574–82

10. Kweon J, Jung J, Kim T, Choi J, Kim D ((2006)) Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding. Compos Struct 75:192–198

11. Huang Z., Sugiyama S., Yanagimoto J. (2014) Adhesive -embossing hybrid joining process to fiber-reinforced thermosetting plastic and metallic thin sheets. Prod Eng 81:2123–2128

12. Ванин Г.А. Механика композиционных материалов / Г.А. Ванин. – Киев: Наукова думка, 1985. – 302 с.

13. Семин М.И. Расчеты соединений элементов конструкций из композиционных материалов на прочность и долговечность / М.И. Семин, Д.В. Стреляев. – М.: Изд-во МГАТУ «ЛАТМЭС», 1996. – 294 с

14. Залога, В. А. Имитационная модель прямоугольного свободного резания [Текст]/ В. А. Залога, Д. В. Криворучко, С. Н. Хвостик //Вестник СумГУ. -2005. -№ 11. -С. 113- 122.

15. Heisel, U. Cause Analysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances [Text] / U. Heisel, D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloha, M. Storchak //Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. -Calabria, 2007. -С. 141- 148.

16. Алфутов Н. А. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н.А.Алфутов, П. А. Зиновьев, Б. Г. Попов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.

17. Болотин В. В. Механика многослойных конструкций / В. В. Болотин, Ю. Н. Новичков. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.

18. Ванин Г. А. Микромеханика композиционных материалов / Г. А. Ванин. – К. : Наук. думка, 1971. – 304 с.

19. Васильев В. В. Механика конструкций из композицион-ных материалов / В. В. Васильев. – М. : Машиностроение, 1988. – 272 с.

20. Верещака С. М. Упругие постоянные и обобщенные характеристики жесткости материала слоистой структуры / С. М. Верещака // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Динамика и прочность машин. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2008. – № 36. – С. 29-40.

21. Верещака С. М. Механіка композиційних матеріалів: навчальний посібник / С. М. Верещака. Суми : Сумський державний університет, 2013. – 160 с. ISBN 978-966-657-454-4

22. ISO 10208 Rock drilling equipment; left-hand rope threads (1991)

23. DIN 20317 Rock drilling - Round thread connections for percussive drilling equipment - Dimensions, design (2014).

24. ГОСТ 24705-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры

25. Криворучко, Д. В. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів [Текст]: навчальний посібник/ Д. В. Криворучко, В. А. Залога, В. Г. Корбач -Суми: Вид-во СумДУ, 2010. -208 с.

26. Довгополов А. Ю. Технологія обробки гвинтової поверхні роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of National Technical University "KhPI" : coll. of sci. papers. Ser. : New solutions in modern technologies. – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – № 42 (1214). – С. 38-42.

27. Некрасов, С. С. Спосіб обробки круглої зовнішньої різьби з великим кроком / С. С. Некрасов, А. Ю. Довгополов, С. О. Чигрин, І. В. Калюжний // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 2(82). – С. 8.

28. Пат.UA 103734. Спосіб обробки круглої внутрішньої різьби/ Некрасов С.С., Криворучко Д. В., Нешта А.О. МПК B23C 3/32 (2006.01), B23B 1/00. - No a201214037 заявл. 10.12.2012; 11.11.2013, бюл. No 21.

29. Сайт компанії виробника металоріжучого інструменту «Guhring» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://guhring-tools.ru/doc/guhring-tehnicheskaya-chast-2011-page7.html

30. Юдин, Е.Я. Охрана в машиностроении: Учебник для машиностроительных вузов/Е. Я. Юдин, С. В. Белов, С. К. Баланцев и др.; Под ред. Е. Я. Юдина, С. В. Белова — 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1983, 432.

31. Гладка, Л.А .Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» в дипломних проектах для студентів спеціальностей 7.090202 та 7.090203 денної та заочної форм навчання/ Суми: Вид-во СумДУ, 2003. - 23с.

32. Защитное заземление и зануление электроустановок: Справочник./ Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. – СПБ.: Политехника, 2005. – 400 с.

33. Методические указания к выполнению курсового и дипломного проектов/ Составители: В.Г. Евтухов, О. У. Захаркин, А. В. Евтухов. - Сумы изд. СумДУ 2007 г.- 52 с.

34. Методичні вказівки до виконання контрольної роботи з курсу "Охорона праці в галузі": для студ. спец. 7.05050201 та 7.05050302 заочної форми навчання / Л. А. Гладка, І. С. Козій. — Суми : СумДУ, 2013. — 32 с.

35. ГОСТ 14861-91. Тара производственная, типы.

36. ГОСТ 12.2.012-90. Вибрационная безопасность.

37. ГОСТ 12.1.003-83. Шум, общие требования безопасности.

38. ГОСТ 12.2.061-81. Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам.

39. ГОСТ 12.2.062-81. Оборудование производственное. Ограждения защитные.

40. ГОСТ 12.2.029-88. Система стандартов безопасности труда. Приспособления станочные. Требования безопасности.

41. ГОСТ 12.4.011-75. Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих.

42. ГОСТ 12.3.002-75 ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности.

43. ГОСТ 12.1.044-89. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов.

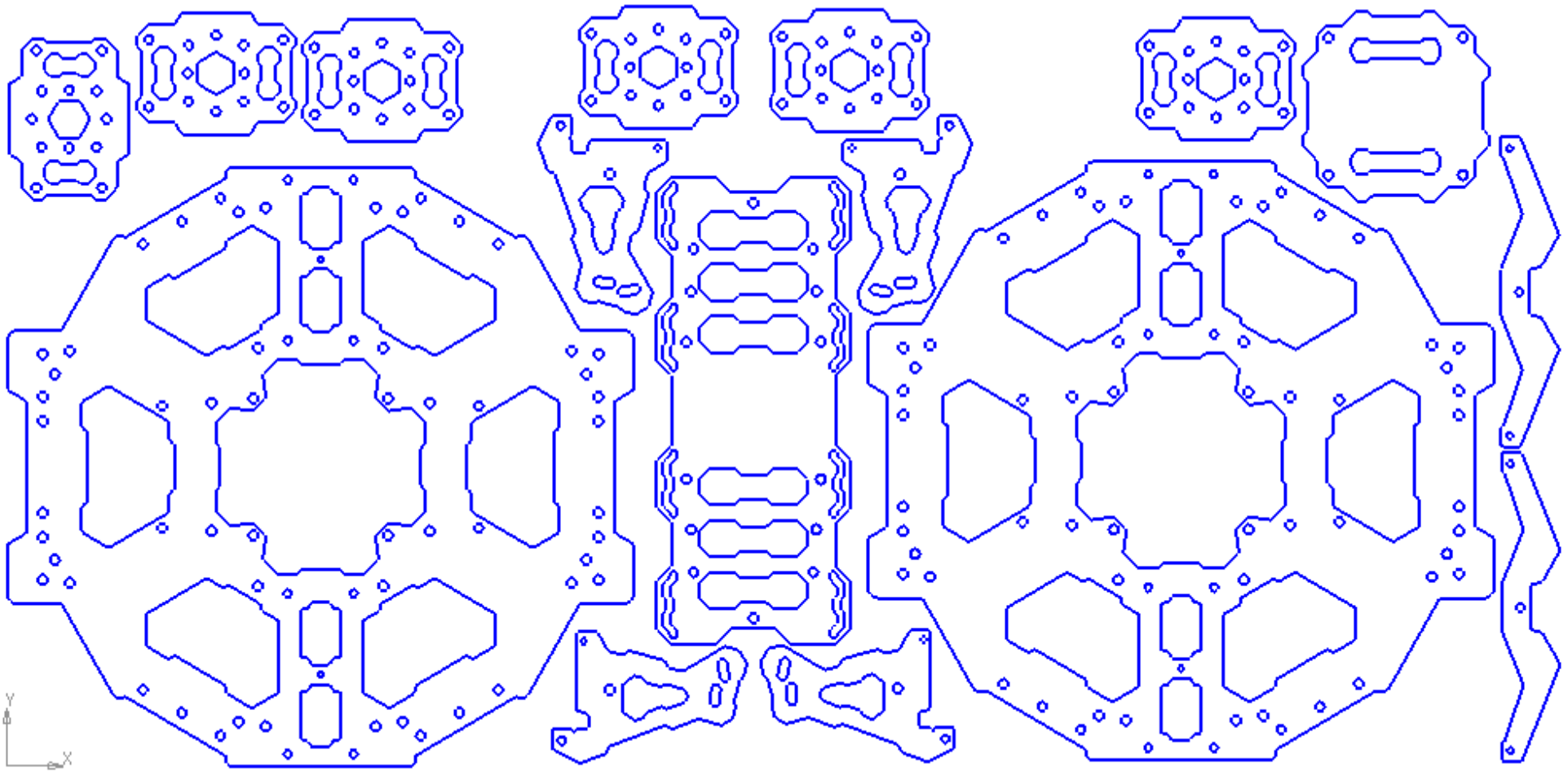
44. ДБН В2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.

45. ДБН Д.2.6-3-2000. Збірник 3. Системи вентиляції і кондиціонування повітря.

46. ДБН В.2.5-56:2010. Системи протипожежного захисту

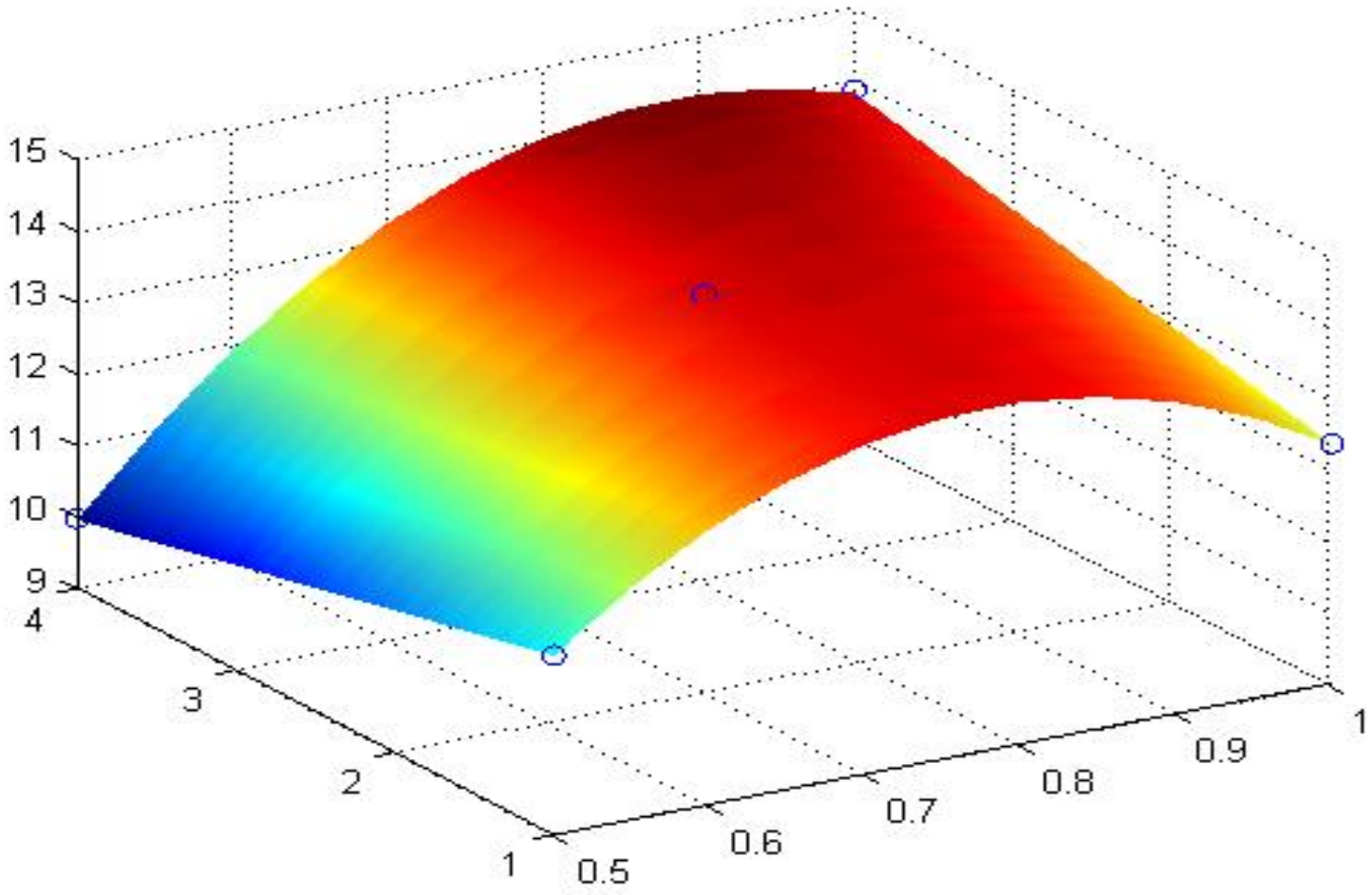
ДОДАТОК А

ЕЛЕМЕНТИ КОРПУСУ КВАДРОКОПТЕРА



ДОДАТОК Б

ГРАФІК ФУНКЦІЇ ЗАЛЕЖНОСТІ КРОКУ ТА ГЛИБИНИ ПРОФІЛЮ ГВИНТОВОЇ ПОВЕРХНІ



ДОДАТОК В

СТАТТЯ

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.993.2
DOI: https://doi.org/10.26642/tn-2018-2(82)-166-173

С.С. Некрасов, к.т.н., доц.
А.Ю. Довгополов, аспірант
С.О. Чигрин, студент
І.В. Калюжний, студент
Сумський державний університет

Спосіб обробки круглої зовнішньої різьби з великим кроком

За рахунок певних змін реалізації способу обробки круглих внутрішніх різьб мірним інструментом [14], а також при використанні додаткового обладнання, а саме однозубого різального інструменту, що має можливість оброблення зовнішньої циліндричної поверхні, та розточувального пристрою, запропоновано адаптувати вищезазначений спосіб для виготовлення зовнішніх різьб. У процесі адаптації було розроблено технологію, що дозволяє виготовити круглу зовнішню різьбу будь-якого типорозміру за один прохід. На основі розробленої технології та за рахунок використання однозубого різального інструменту і розточувального пристрою були проведені дослідження, в результаті яких установлена можливість механічного оброблення різьбових вставок цією технологією. Проведені дослідження дали можливість виготовити металеві вставки із зовнішньою круглою різьбою з великим кроком запропонованим способом. Необхідно відзначити, що спосіб не потребує використання спеціалізованого дорогого обладнання, для нарізання круглої різьби з великим кроком.

Ключові слова: *кругла різьба; розточувальний пристрій; однозубий різальний інструмент; обробка круглої різьби; механічне оброблення зовнішньої різьби.*

Вступ. Актуальність проблеми. Кругла різьба використовується в машинобудуванні в обмежених випадках. В основному для з'єднання тонкостінних труб між собою, чи для деталей при роботі з якими легкість згвинчування відіграє важливу роль, або ж коли різьбове з'єднання працює в забрудненому середовищі. Нерідко, круглу різьбу застосовують в санітарно-технічній арматурі чи коли за способом обробки недоцільне використання профільної, наприклад для жесті, скла, керамічних матеріалів, штучних смол [1, 2]. До деталей, в яких виконують круглу різьбу, можна віднести: з'єднувальні й перехідні муфти, гайки, деталі водопровідної і тому подібної арматури. Оскільки кругла різьба добре працює в умовах забрудненої різьбової поверхні, то її нерідко нарізають на виробах, що експлуатуються у важких умовах [3]. Цей тип різьби характеризується великою довжиною профілю, відсутністю гострих кутів на витках і великим кутом підйому гвинтової лінії для опору динамічним навантаженням у процесі експлуатації таких з'єднань [4].

Деталі, на яких формоутворюється кругла різьба шляхом різання (профіль круглої різьби з основними параметрами показаний на рисунку 1) мають певні труднощі при їх виготовленні. Труднощі виникають при нарізанні на деталях як зовнішнього так і внутрішнього профілю різьби, оскільки кругла різьба має профіль який характеризується малим внутрішнім діаметром та великий кроком, по відношенню до діаметру.

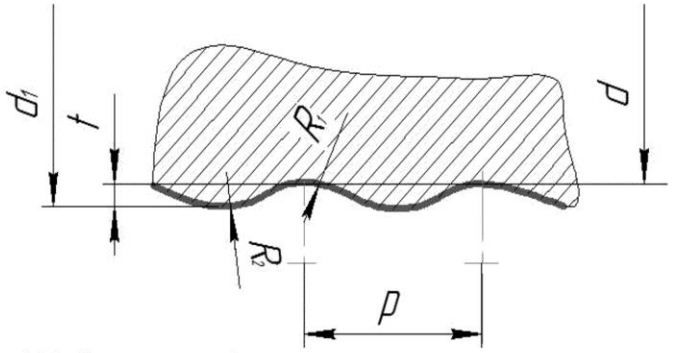


Рис. 1. Профіль круглої різьби із зазначенням всіх основних параметрів:
d_1 – зовнішній діаметр різьби; d – внутрішній діаметр різьби; t – глибина профілю; p – крок різьби; R_1 та R_2 – радіуси западин і виступів різьб відповідно

© С.С. Некрасов, А.Ю. Довгополов, С.О. Чигрин, І.В. Калюжний, 2018

ISSN 1728-4260 ВІСНИК ЖДТУ. 2018. № 2 (82)

На сьогодні відомі такі способи обробки круглої різьби, з великим кроком та малим внутрішнім діаметром:

– точіння фасонним різцем із застосуванням стандартного циклу нарізання різьби за декілька проходів;
– точіння стандартним різцем зі змінною глибиною різання;
– порядкове точіння стандартним різцем.

Кожен із запропонованих способів відрізняється один від одного кінематикою рухів, застосовуваним інструментом і способом формоутворення.

Якщо розглянути перший із вищенаведених способів, а саме це точіння фасонним різцем методом стандартного нарізання різьби за декілька проходів, то припуск у цьому способі знімається завдяки синхронному обертанню деталі й прямолінійному переміщенню фасонного різця вздовж її осі. За один оберт заготовки різець переміщається на відстань, що дорівнює кроку різьби, при цьому врізання за глибиною здійснюється за декілька проходів. Спосіб аналогічний нарізанню метричної різьби різцем на токарному верстаті. Глибина кожного проходу зазвичай різна. Для кожного конкретного профілю різьби визначається оптимальна величина площі поперечного перерізу зрізуваного різцем шару, що в процесі різання повинна залишатися незмінною або наближатися до неї. Це забезпечується зменшенням глибини різання за кожним проходом [5]. Модель точіння фасонним різцем із застосуванням стандартного циклу нарізання різьби за декілька проходів наведена на рисунку 2.

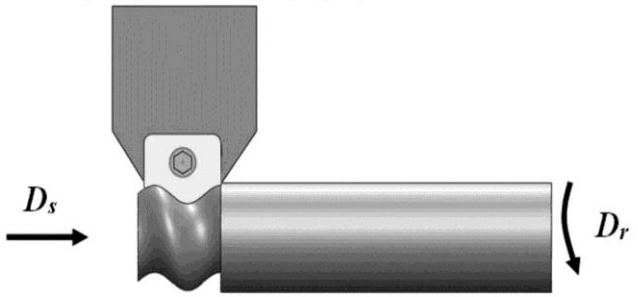


Рис. 2. Модель точіння фасонним різцем із застосуванням стандартного циклу нарізання різьби за декілька проходів

Недоліками цього способу обробки, є:

– необхідність використання спеціальних різьбових різців і пластин;
– необхідність обробки за кілька проходів;
– велика сила різання;
– низька стійкість інструменту;
– виконання технологічної канавки для виходу різця [6].

Варіації цього способу поширені в таких наукових працях і винаходах [7–10]. Основними недоліками способу у більшості вищерозглянутих працях, є підвищені вібрації внаслідок великої довжини контакту різальної кромки та деталі і, як наслідок, погіршення якості поверхні та зменшення продуктивності процесу обробки. До недоліків цього методу також можна віднести необхідність використання спеціалізованих вартісних різальних пластин [7] для кожного кроку різьби, що значно підвищує собівартість її обробки.

Вище зазначений спосіб обробки круглої різьби кардинально відрізняється від попереднього, оскільки реалізувати цей спосіб можна лише на верстатах що дозволяють складну кінематику рухів, вони повинні забезпечувати синхронність обертання шпинделя і радіальне зворотно-поступальне переміщення різця. Адже при точінні стандартним різцем зі зміною глибиною різання (рис. 3) зняття припуску здійснюється за рахунок поєднання рівномірного обертального руху деталі й прямолінійного вздовж її осі та одночасно радіального зворотно-поступального руху різця. Точіння необхідного профілю різьби можна здійснювати за один прохід. Подача в даному разі визначається не кроком різьби, а нормативними значеннями для конкретної використовуваної пластини, матеріалу деталі, глибини профілю і заданої шорсткості оброблюваної поверхні [10].

Основна проблема під час реалізації даного способу – виконання синхронних рухів для здійснення обробки, для цього необхідне використання спеціально оснащеного токарного верстата, що забезпечує синхронність обертання шпинделя і радіальне зворотно-поступальне переміщення різця, або використання верстату із ЧПК з керованою С-віссю, що реалізує складну кінематику рухів, змінну глибину різання на вершинах і западинах профілю.

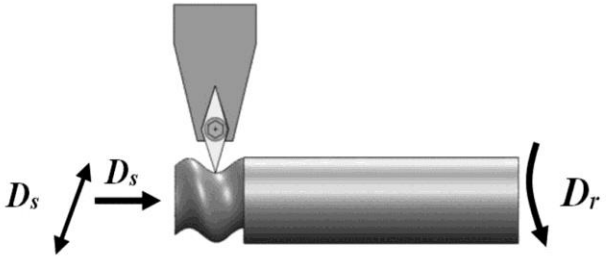
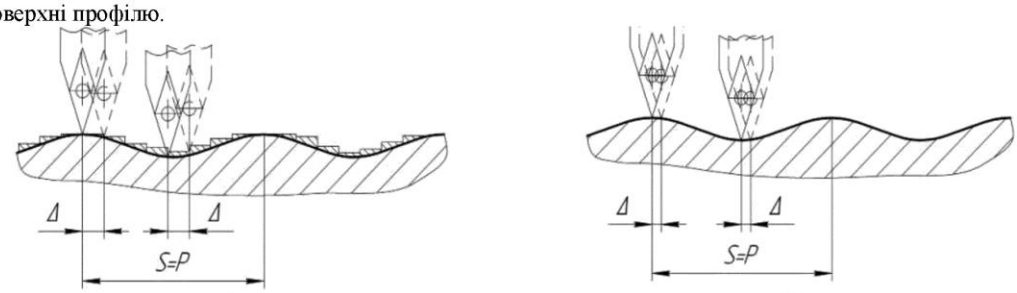


Рис. 3. Точіння стандартним різцем зі змінною глибиною різання

Для обробки круглих різьб також застосовують спосіб точіння стандартним різцем із постійним зміщенням вершини різця вздовж профілю різьби, де знімання припуску здійснюється за рахунок виконання різцем декількох проходів (рис. 4). Кінематичні рухи при цьому є поєднанням синхронного рівномірного обертального руху деталі і прямолінійного рух різця вздовж її осі (рис. 5). Початок кожного нового проходу зміщений щодо попереднього, повторюючи профіль різьби. Величину зміщення в радіальному та осьовому напрямках необхідно дуже точно розраховувати з урахуванням радіуса при вершині, щоб забезпечити отримання необхідного профілю різьби [11]. Величина зміщення нового проходу щодо попереднього повинна бути достатньою для забезпечення необхідної точності та, особливо, шорсткості різьової поверхні, оскільки в результаті зміщення утворюється макрорельєф на поверхні профілю.



а *б*

Рис. 4. Схема зрізання припуску при точінні внутрішніх різей стандартним різцем: а) чорнова обробка; б) чистова обробка

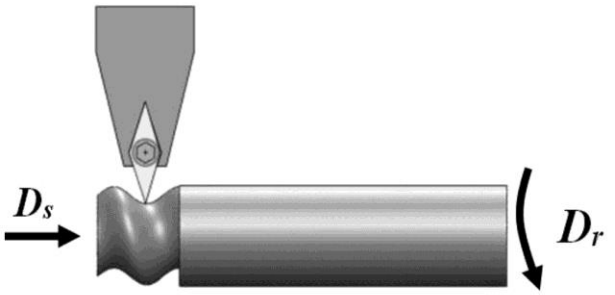


Рис. 5. Модель точіння стандартним різцем

Спосіб може бути реалізований на універсальному обладнанні й характеризується низькими силами різання та вібраціями, що дозволяє забезпечити відносно високу стійкість інструменту [12, 13]. Недолік цього методу полягає в тому, що точність і шорсткість профілю круглої різьби залежить від величини радіальних та осьових зміщень.

Всі вищеописані способи підходять як для обробки внутрішніх так і зовнішніх різьбових поверхонь, оскільки кінематика процесу залишається незміною в процесі оброблення, а змінюється лише інструмент який використовується для виготовлення різьби. У випадку обробки зовнішньої круглої різьби конструкція інструменту забезпечує можливість його руху по зовнішній поверхні деталі на якій формується різьба, а при виготовлені внутрішньої навпаки.

ISSN 1728-4260 ВІСНИК ЖДТУ. 2018. № 2 (82)

Ще один спосіб обробки круглої внутрішньої різьби (був запропонований у 2013 році) – це обробка різьбової поверхні мірним інструментом (рис. 6), цей спосіб був узятий за основу для подальшої роботи [14].

Згідно з цим способом, обробку круглої внутрішньої різьби виконують за один прохід. Кінематика самого процесу обробки така: різальному інструменту надають прямолінійного руху вздовж осі заготовки, як різальний інструмент використовують мірну фрезу з діаметром D, що дорівнює сумі внутрішнього діаметра D_1 різьби, висоти H_1 профілю і допуску T_{H1} на висоту профілю різьби, з рівномірно розподіленими по периферії фрези різальними пластинами, профіль яких встановлений симетрично відносно площини, перпендикулярної до осі фрези, і з кутом ε при вершині що дорівнює 35°÷90°, при цьому фрезі надають обертання щодо власної осі й додатково забезпечують коловий рух фрези навколо осі заготовки, узгоджений із прямолінійним рухом фрези таким чином, що за один коловий рух фрезі надають прямолінійного руху вздовж осі заготовки, величина якого дорівнює кроку p різьби, причому діаметр колового руху дорівнює сумі висоти H_1 профілю різьби і допуску T_{H1} на висоту профілю; крім того, вісь заготовки розміщують паралельно відносно осі обертання фрези.

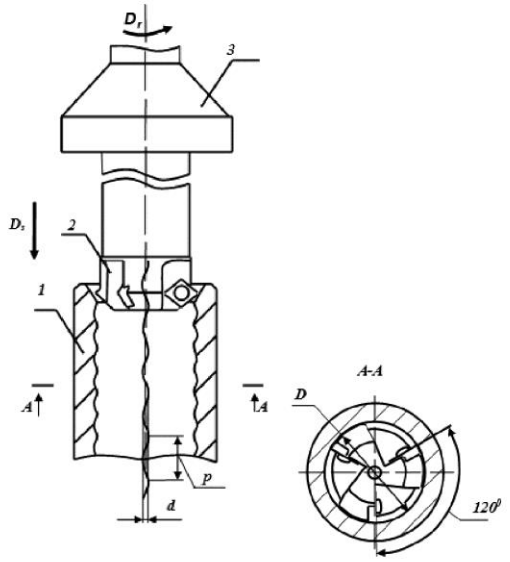


Рис. 6. Спосіб обробки круглої внутрішньої різьби мірним інструментом [15]

Оскільки профіль різьби таким способом одержують як огинаючу послідовного ряду положень різальної кромки інструменту в результаті його переміщення відносно оброблюваної поверхні заготовки, то такий спосіб отримання можна віднести до методу огинання. Більше того, істотною відмінністю цього способу від вихрового нарізання різьби є те, що в розглянутому способі профіль різальної кромки не копіюється на оброблювану поверхню, а різальна кромка знаходиться завжди на оброблюваній поверхні. Обробка різьби способом огинання вперше запропонована лише в 2013 році [14], тому на сьогодні є дуже мало наукових праць що до цього напрямку.

Основним недоліком представленого способу є те, що за даної реалізації процесу обробки його можна використовувати лише для нарізання внутрішніх різьб, а також для кожного типорозміру різьби необхідно виготовляти різальний інструмент необхідного діаметра.

У сучасних умовах швидкого розвитку промисловості та машинобудування є велика потреба виробництв щодо нових універсальних способів обробки, які б потребували як можна менше матеріальних і фізичних затрат для виготовлення продукції, під час реалізації яких не потрібно було б використовувати дорогий інструмент та обладнання для реалізації процесу виготовлення продукції.

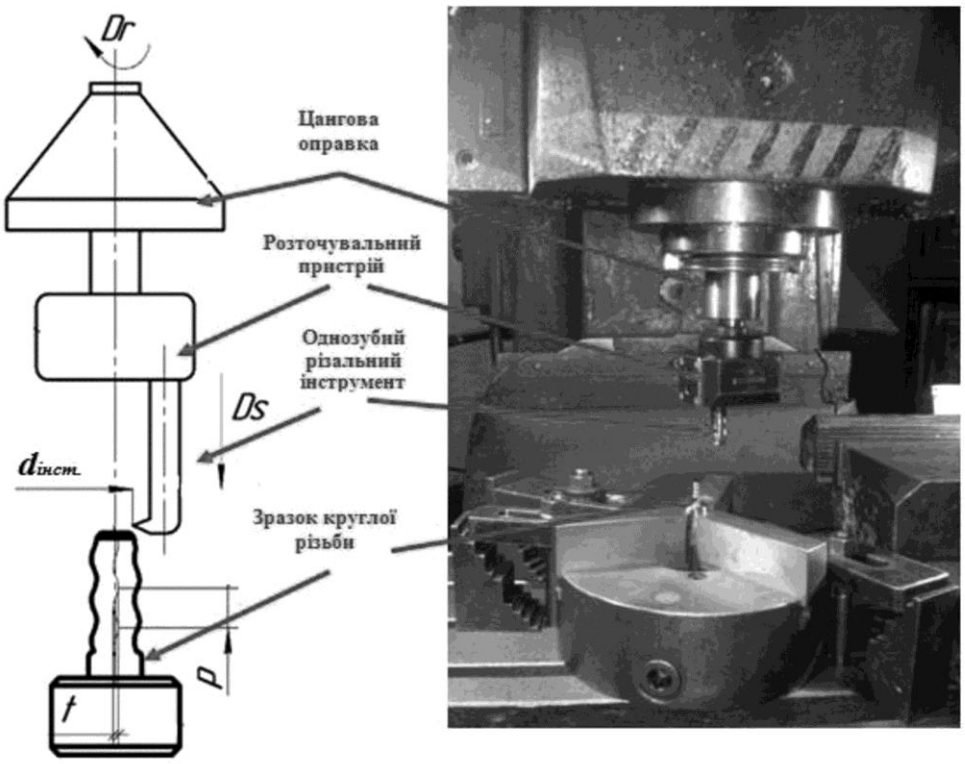
Мета дослідження. Адаптація способу виготовлення круглої внутрішньої різьби мірним інструментом для обробки круглої зовнішньої різьби будь якого типорозміру, за рахунок застосування однозубого різального інструменту та розточувального пристрою.

Викладення основного матеріалу. Викладення основного матеріалу.

Як уже зазначалося вище, представлений спосіб формоутворення круглої різьби (рис. 6) має два істотних недоліки. Основним недоліком є те що, за цієї реалізації процесу обробки його можна використовувати лише для нарізування внутрішніх різьб, а також для кожного типорозміру різьби необхідно виготовляти різальний інструмент необхідного діаметра.

Саме за рахунок певних змін у реалізації цього способу, а також використання додаткового обладнання, а саме однозубого різального інструменту та розточувального пристрою (рис. 7 *а*, *б*), вдалося адаптувати вищезазначений спосіб для обробки круглих зовнішніх різьб за один прохід.

Спрощена кінематика процесу фрезерування різьби має такий вигляд: різальному інструменту надають прямолінійного руху уздовж осі заготовки, обертання щодо власної осі та колового руху навколо осі заготовки, який узгоджений із прямолінійним рухом різального інструменту вздовж осі заготовки таким чином, що за один коловий рух різальному інструменту надають прямолінійний рух уздовж осі заготовки на величину, що дорівнює кроку ***p*** різьби, крім того, вісь заготовки розміщують паралельно відносно осі обертання різального інструменту. Як різальний інструмент використовують різець, який може формувати діаметр $d_{інст.}$,що дорівнює сумі внутрішнього діаметра ***d*** різьби та глибини ***t*** профілю різьби (рис.7 *а*).



а) *б)*

Рис. 7. Запропонований спосіб обробки круглої зовнішньої різьби:
а) спрощена кінематика процесу обробки; б) фото процесу формоутворення круглої різьби

Величину діаметра $\mathbf{d_{інст.}}$, для обробки круглої різьби визначають за формулою 1, та встановлюють її на розточувальному пристрої

$$d_{инст.} = d + t, \quad (1)$$

де ***d*** – внутрішній діаметр різьби, мм;

t – глибина профілю різьби, мм.

Спосіб реалізовують на трикоординатному верстаті з ЧПК 6Р13Ф3, у шпинделі якого встановлюють цангову оправку із закріпленим у ній розточувальним пристроєм та однозубим різальним інструментом (рис. 7 *б*).

Обробку круглої зовнішньої різьби проводять з однієї установки заготовки, перед цим виконавши на заготовці зовнішній діаметр та фаску для заходу різьби. Для цього способу не обов'язково виконання канавки для виходу інструменту.

Режими обробки круглої зовнішньої різьби вибирають згідно з рекомендованими режимами для різального інструменту, в залежності від оброблюваного матеріалу заготовки.

Обробляють різьбу в такій послідовності:

ISSN 1728-4260 ВІСНИК ЖДТУ. 2018. № 2 (82)

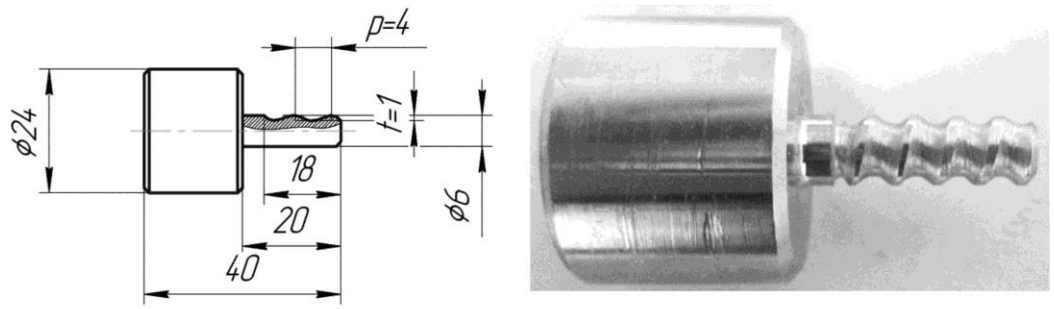
1. На прискореному переміщенні уздовж осі заготовки підводять однозубий різальний інструмент до заготовки у вихідну позицію.

2. Задають інструменту обертання навколо власної осі, яке забезпечує головний рух різання D_r.

3. Надають різальному інструменту коловий рух навколо осі заготовки, узгоджений з прямолінійним рухом D_s. За один коловий рух інструмент переміщується уздовж осі заготовки, на величину кроку ***p*** мм різьби. Діаметр колового руху інструменту дорівнює ***t*** глибині профілю різьби. Інструмент на робочій подачі переміщують уздовж осі заготовки на задану глибину.

4. Реверсують траєкторію переміщення вздовж осі заготовки та виводять інструмент із різьбової зовнішньої поверхні на прискореній подачі в початкове положення. Діаметр колового руху при виведенні з різьбової зовнішньої поверхні дорівнює глибині профілю різьби ***t.***

Для практичної перевірки, запропонованою технологією були виготовлені металеві вставки з конструкційної сталі, ескіз даної вставки представлений на рисунку 8 *а*.



а) *б)*

Рис. 8. Металеві вставки круглої зовнішньої різьби: а) ескіз металевої вставки; б) фото вставки

Для повної перевірки, можливості обробки круглої зовнішньої різьби запропонованою технологією, металеві вставки виготовлялися з різними основними параметрами такими як крок різьби ***p*** та глибина профілю різьби ***t***. У таблиці 1 подані параметри, що змінювалися, та межі варіювання даними параметрами в процесі експерименту.

Таблиця 1

Параметри що змінювалися в ході експерименту

Параметр що змінювався	Позначення	Межі варіювання
Глибина профілю різьби	t	0,5–1,0
Крок різьби	p	1,0–4,0

Обравши всі необхідні значення кроку різьби ***p*** та глибини профілю різьби ***t***, було розраховано діаметр фрези за формулою 1, який необхідно встановлювати на розточувальному пристрої. Всі подальші розрахунки зведені в таблицю 2.

Таблиця 2

Розрахунковий діаметр фрези та обрані значення параметрів

t	p	Діаметр фрези
1	4	5
1	1	5
0,5	4	5,5
0,5	1	5,5
0,75	2,5	5,25

На основі поданої технології на вставках вдалося виготовити круглу зовнішню різьбу з різними параметрами, які представлені в таблиці 2, для кожного випадку виконано по п’ять дослідів для перевірки адекватності запропонованого способу обробки різьбової поверхні. Фото «вставки круглої різьби» з кроком різьби 4 мм та глибиною профілю різьби 0,5 мм представлено на рисунку 8 *б*.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість виготовлення круглої зовнішньої різьби вищеописаним способом, що дозволяє зробити висновок що поставлена на початку дослідження мета адаптації способу [14] виконана в повному обсязі.

Висновки. У результаті проведеного експериментального дослідження, було адаптовано раніше відомий спосіб обробки круглих внутрішніх різьб для обробки зовнішніх, за рахунок додаткового введення в систему розточувального пристрою та однозубого різального інструменту.

В процесі адаптації було розроблено таку технологію обробки різьб, на основі якої, можливо виготовити круглу зовнішню різьбу будь-якого типорозміру за один прохід, за рахунок використання розточувального пристрою, оскільки значення діаметру інструменту $\mathbf{d_{інст.}}$ встановлюється саме на цьому пристрої.

В запропонованому авторами способі обробки круглих зовнішніх різьб, є дві суттєві переваги які кардинально відрізняють його від всіх інших способів для виготовлення круглих зовнішніх різьб. Перша, це те що формоутворення різьбової поверхні відбувається за один прохід, друга, для його реалізації не потрібно використовувати спеціалізоване дороге обладнання.

Перспективи подальших досліджень.

Подальші дослідження будуть спрямовані на підтвердження скорочення часу обробки зовнішньої круглої різьби вказаним способом. Для цього планується провести експериментальне дослідження, в якому виконати механічну обробку даним способом зовнішньої різьби різного типорозміру, з подальшим порівнянням затраченого часу на обробку, з часом який витрачається на обробку різьби іншими способами. Також в подальшому, даний спосіб обробки планується використати для виготовлення, вставок з круглою зовнішньою різьбою, для дослідження міцності роз'ємного різьбового з'єднання з круглою різьбою в деталях виготовлених з армованих композиційних матеріалів.

Список використаної літератури:

1. Sandvik top hammer rock drilling tools [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу : http://www.docucuarchive.com/view/e64ea8b8450102afc49c4df48ae80672/SAnDvik-TOP-HAmmER-ROCk-DRiLLinG TOOLS.pdf.
2. *Jimeno E.L.* Drilling and blasting of rocks / *E.L. Jimeno*. – Rotterdam : Brookfield, 1995. – 392 с.
3. *Некрасов С.С.* Исследование возможности коррекции размеров круглой резьбы при обработке мерным инструментом / *С.С. Некрасов*, *Е.А. Агеева* // Журнал інженерних наук. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. А34–А37.
4. ISO 10208 Rock drilling equipment ; left-hand rope threads. – 1991.
5. Patent US 2008149698A (2010) USA, The female part of the drilling equipment and its manufacturing method.
6. *Некрасов С.С.* Способы обработки круглой резьбы / *С.С. Некрасов*, *Д.В. Криворучко*, *А.А. Нешта* // Оборудование и инструмент для профессионалов: металлообработка. – 2013. – № 4. – С. 86–88.
7. Patent US 6293360 B1 (2001). USA. Thread joint percussive drilling equipment. Liljebrand Per-Olof, Olsson U.
8. Patent WO 2007133145 A1 (2007). A female part for top hammer-drilling and method for manufacturing a female part. Nava P., Sörensen P.
9. Patent US 5064004 A (1991). USA, Drill rod for percussion drilling. Lars-Gunnar. L.
10. Patent US5044842 A (1991). USA, Round screw thread machining method / *M.Miyata*, *T.Matsumura*, *M.Kawasumi*.
11. Patent 2334590 (2008). Combined method of needle-turning threads machining.
12. *Древаль А.Е.* Точность обработки внутренних резьб комбинированным инструментом / *А.Е. Древаль*, *О.В. Мальков*, *А.В. Литвиненко* // Известия высших учебных заведений. Серия : Машиностроение. – 2011. – № 12. – С. 45–52.
13. *Mal'kov V.A.* Precision of the external-thread profile in thread cutting / *V.A. Mal'kov* // Russian Engineering Research. – 2013. – № 33. – Pp. 172–175.
14. Пат. UA 103734. МПК B23C 3/32 (2006.01), B23B 1/00. Спосіб обробки круглої внутрішньої різьби / *С.С. Некрасов*, *Д.В. Криворучко*, *А.О. Нешта*. – № a201214037 ; заявл. 10.12.201 2; 11.11.2013, Бюл. № 21.

References:

1. SANDVIK Coromant (2016), «Sandvik top hammer rock drilling tools», Available at: http://www.docucu archive.com/view/e64ea8b8450102afc49c4df48ae80672/SAnDvik-TOP-HAmmER-ROCk-DRiLLinG-TOOLS.pdf.
2. Jimeno, E.L. (1995), *Drilling and blasting of rocks*, *Rotterdam*, *Brookfield*, 95 p.
3. Nekrasov, S.S. and Ageeva, E.A. (2016), *Investigation of the possibility of correction circular thread sizes in the processing of dimensional tool Wood,* Journal of Engineering, No. 3, Pp. 34–37.
4. ISO 10208 (1991), Rock drilling equipment, left-hand rope threads.
5. The female part of the drilling equipment and its manufacturing method (2010), USA, Patent US 2008149698A.
6. Nekrasov, S.S., Krivoruchko, D.V. and Neshta, A.A. (2013), «Methods of processing round thread», *Equipment and tools for professionals*, No. 4, Pp. 86–88.
7. Liljebrand, Per-Olof and Olsson, U. (2001), Thread joint percussive drilling equipment, USA, Patent US 6293360 B1.
8. Nava, P. and Sörensen, P. (2007), A female part for top hammer-drilling and method for manufacturing a female part, Patent WO 2007133145 A1.
9. Lars-Gunnar, L. (1991), USA, Drill rod for percussion drilling, Patent US 5064004 A.
10. Miyata, M., Matsumura, T. and Kawasumi, M. (1991), Round screw thread machining method, USA, Patent US5044842 A.
11. Combined method of needle-turning threads machining, (2008), Patent 2334590.

12. Dreval', A.Y., Mal'kov, O.V. and Litvinenko, A.V. (2011), «Tochnost' obrabotki vnutrennikh rez'b kombinirovannym instrumentom, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy*, Seriya Mashinostroyeniye, No. 12, Pp. 45–52.
13. Mal'kov, V.A. (2013), «Precision of the external-thread profile in thread cutting», *Russian Engineering Research*, No. 33, Pp. 172–175.
14. Nekrasov, S.S., Kry`voruchko, D.V. and Neshta, A.O. (2012), Sposib obrobky` krugloyi vnutrishn`oyi riz`by`, [The method of machining of the round internal thread], Patent UA 103734.

Некрасов Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри опору матеріалів і машинознавства Сумського державного університету.
Наукові інтереси:
– технологія машинобудування;
– системи автоматизованого проектування.
E-mail: nekrasovss@gmail.com.

Довгополов Андрій Юрійович – аспірант кафедри ТМВІ Сумського державного університету.
Наукові інтереси:
– теорія різання;
– верстати з ЧПК.
E-mail: d_a_y_@ukr.net.

Чигрин Сергій Олегович – студент кафедри ТМВІ Сумського державного університету.
Наукові інтереси:
– теорія різання;
– верстати з ЧПК.

Калюжний Іван Володимирович – студент кафедри ТМВІ Сумського державного університету.
Наукові інтереси:
– теорія різання;
– верстати з ЧПК.
E-mail: endaeron@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2018.

ДОДАТОК Г

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО – ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ