

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри

_____ Олександр САЛЕНКО

«__» _____ 2026 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Конструювання та дизайн машин»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему: «Фреза дискова для оброблення граніту»

Виконав (-ла): Ломаков Володимир ігорович
студент IV курсу, групи МК-22
Ломаков Володимир Ігорович _____

Керівник: к.т.н., доц. Красновид Д.О.
Посада, науковий ступінь, вчене звання,
Красновид Дмитро Олександрович _____

Рецензент: к.т.н., доц. Кореньков В.М.
Посада, науковий ступінь, вчене звання,
Прізвище, ім'я, по батькові _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ
ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН**

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Спеціальність 131 Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма «Конструювання та дизайн машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олександр САЛЕНКО

“ _____ ” _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту**

Ломакову Володимирі Ігоровичу

1. Тема проєкту – «Фреза дисков для оброблення граніту» керівник проєкту Красновид Дмитро Олександрович, доцент, к.т.н, затверджені наказом по університету №2019-с від 01.06.2026 р. 10.06.2026

2. Термін подання студентом проєкту _____

3. Вихідні дані до проєкту _____

4. Зміст пояснювальної записки _____

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов’язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) _____

6. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка

Студент

Володимир ЛОМАКОВ

Керівник

Дмитро КРАСНОВИД

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт присвячено розробленню дискової фрези для обробки граніту, призначеної для роботи на мостовому каменерізному верстаті з водяним охолодженням. У роботі проаналізовано властивості граніту, способи його механічної обробки, конструкції алмазного дискового інструменту та умови експлуатації великогабаритних фрез. Розроблено конструкцію фрези зі сталевим корпусом діаметром 800 мм, робочим діаметром 840 мм, посадковим отвором Ø90 мм і 46 алмазними сегментами розміром 33×20×5,4 мм. Робоча поверхня сегмента має профільоване заглиблення, призначене для прискорення припрацювання металевої зв'язки та розкриття алмазних зерен. Виконано розрахунок розміщення сегментів і режимів різання, обґрунтовано матеріал корпусу, спосіб паяння сегментів та вимоги до контролю радіального і торцевого биття. Розроблено базовий технологічний процес, що охоплює лазерне різання, термічну стабілізацію, внутрішнє шліфування посадкового отвору, шліфування опорних площадок, автоматизоване паяння сегментів і заключний контроль. Також розроблено контрольне пристосування та передбачено симуляцію виготовлення корпусу на верстаті з ЧПК.

Ключові слова: дискова фреза, граніт, алмазний сегмент, корпус фрези, паяння, режими різання, контроль биття, технологічний процес.

ANNOTATION

The bachelor's diploma project is devoted to the development of a circular cutter for granite machining intended for operation on a bridge stone-cutting machine with water cooling. The study analyses granite properties, mechanical stone-processing methods, diamond circular-tool designs, and the operating conditions of large-diameter cutters. A cutter design with an 800 mm steel body, an 840 mm working diameter, a Ø90 mm mounting bore, and 46 diamond segments measuring 33×20×5.4 mm was developed. The segment working surface incorporates a profiled recess intended to accelerate the running-in of the metallic bond and improve diamond-grain exposure. Segment arrangement and cutting conditions were calculated, while the body material, segment brazing method, and requirements for radial and axial runout inspection were substantiated. A basic manufacturing process was developed, including laser cutting, thermal stabilization, internal grinding of the mounting bore, grinding of segment support seats, automated segment brazing, and final inspection. A dedicated inspection fixture was also designed, and CNC simulation of the cutter-body manufacturing process was provided.

Keywords: circular cutter, granite, diamond segment, cutter body, brazing, cutting conditions, runout inspection, manufacturing process.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ГРАНІТУ ТА РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ	10
1.1 Природний камінь і вихідні умови обробки граніту	10
1.2 Способи обробки природного каменю.....	11
1.3 Різальні інструменти для каменеобробки.....	13
1.4 Алмазний дисковий інструмент і сегменти для різання граніту.....	16
1.5 Технологічна сутність різання граніту дисковою фрезою.....	19
1.6 Верстати для різання граніту дисковим інструментом	21
1.7 Вихідні технічні дані та режими різання фрези Ø800 мм.....	26
1.8 Фактори якості різання та ресурсу фрези	29
1.9 Висновки до розділу 1	31
2 КОНСТРУЮВАННЯ ДИСКОВОЇ ФРЕЗИ ДЛЯ РІЗАННЯ ГРАНІТУ	
32	
2.1 Вихідні дані для конструювання	32
2.2 Обґрунтування конструктивної схеми фрези.....	33
2.3 Конструкція корпусу фрези.....	34
2.4 Конструкція та розміщення алмазних сегментів	36
2.5 Розрахунок розміщення алмазних сегментів	38
2.6 Обґрунтування геометрії, центрування та послідовності паяння сегментів	40
2.7 Паяне з'єднання алмазних сегментів із корпусом	42
2.8 Матеріал корпусу та вимоги до термічної стабільності.....	44
2.9 Вимоги до балансування фрези	46
2.10 Технічні вимоги до готової фрези	47
Висновки до розділу 2	50
3 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДИСКОВОЇ ФРЕЗИ.....	51
3.1 Аналіз технологічності конструкції дискової фрези	51
3.2 Базовий технологічний процес виготовлення дискової фрези.....	51
3.3 Вибір і розрахунок режимів різання дискової фрези	55
Висновки до розділу 3	57
4 КОНТРОЛЬНЕ ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ РАДІАЛЬНОГО ТА ТОРЦЕВОГО БИТТЯ	58
4.1 Призначення та вимоги до контрольного пристосування	58
4.2 Конструкція та принцип дії пристосування	59
4.3 Базування та закріплення фрези	61
4.4 Методика контролю радіального і торцевого биття.....	61
4.5 Розрахунок точності контрольного пристосування.....	62
4.6 Висновки до розділу 4	64
5 СИМУЛЯЦІЯ ЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ КОРПУСА ДИСКОВОЇ ФРЕЗИ У СЕРЕДОВИЩІ AUTODESK FUSION	65

ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72
ДОДАТОК А	.74

ВСТУП

Природний камінь залишається одним із важливих конструкційних і декоративних матеріалів у будівництві, архітектурі, благоустрої та меморіальному виробництві. Серед природних кам'яних матеріалів особливе місце займає граніт, який характеризується високою міцністю, твердістю, зносостійкістю, морозостійкістю та довговічністю. Ці властивості забезпечують високу експлуатаційну надійність виробів, однак одночасно ускладнюють механічне оброблення гранітних заготовок.

Однією з основних операцій у каменеобробному виробництві є різання граніту на плити, бруски, сходинок, бордюрні елементи, заготовки для пам'ятників та інші деталі. Якість цієї операції впливає на точність геометричних розмірів, шорсткість поверхні різку, кількість сколів, тривалість подальшого шліфування і полірування, а також на загальну продуктивність виробництва.

Для різання граніту найдоцільніше застосовувати алмазний дисковий інструмент. У такій фрезі сталевий корпус виконує несучу функцію, а алмазні сегменти безпосередньо руйнують камінь у зоні різання. Ефективність роботи інструмента визначається не лише діаметром фрези, а й матеріалом корпусу, геометрією сегментів, концентрацією алмазу, способом кріплення напайок, режимом різання та умовами водяного охолодження.

Актуальність теми полягає в необхідності розроблення фрези для різання граніту, яка може застосовуватися на мостових каменерізних верстатах різних моделей за умови відповідності посадкових розмірів, швидкості обертання та потужності привода. Такий інструмент має забезпечувати стабільний пропил, мінімальну кількість дефектів на крайках, достатній ресурс алмазних напайок і технологічність виготовлення.

Метою дипломного проєкту є розроблення фрези для різання граніту з обґрунтуванням її конструкції, основних геометричних параметрів, вибору алмазних напайок, режимів різання та технології виготовлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати властивості граніту як оброблюваного матеріалу, розглянути способи обробки природного каменю, визначити місце дискової фрези серед різальних інструментів, проаналізувати конструкцію алмазного дискового інструмента, розглянути роботу мостових верстатів, прийняти вихідні технічні дані для фрези та сформулювати вимоги до її конструкції.

Об'єктом проектування є дискова фреза для різання граніту. Предметом розроблення є конструкція фрези, її сталевий корпус, алмазні сегменти, спосіб їх кріплення, режим різання та вимоги до виготовлення й контролю.

1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ГРАНІТУ ТА РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

У першому розділі розглянуто природний камінь як об'єкт механічного оброблення, основні способи обробки каменю, класифікацію різальних інструментів, особливості алмазного дискового інструмента, процес різання граніту, роботу мостових каменерізних верстатів та вихідні технічні дані для проєктованої фрези. Розділ є базою для подальшого конструювання фрези діаметром 800 мм.

1.1 Природний камінь і вихідні умови обробки граніту

Природний камінь у промисловості розглядають не лише як декоративний матеріал, а як заготовку з певними фізико-механічними властивостями. Для розмірного каменю важливими є розміри блока або плити, форма, структура, колір, фактура, міцність, довговічність і здатність до полірування [2], [3]. Ці властивості визначають вибір обладнання, інструмента та режимів обробки.

Граніт є магматичною породою зернисто-кристалічної будови. Його мінеральний склад містить кварц, польовий шпат і темноколірні мінерали. Наявність кварцу підвищує твердість і абразивність породи, тому граніт обробляється складніше, ніж м'які та середньої твердості камені. У процесі різання навантаження на алмазні зерна є нерівномірним, оскільки окремі мінеральні включення мають різну твердість.

У навчальному посібнику [1] зазначено, що зношування різального інструменту при обробці гірських порід істотно залежить від абразивності породи, контактного тиску між інструментом і матеріалом та мікротвердості породи. Для фрези, яка проєктується, це означає необхідність достатньої

жорсткості корпусу, правильно підбраної ширини напайок, стабільного кріплення сегментів і ефективного водяного охолодження.

Таблиця 1.1 – Властивості граніту, що впливають на процес різання

Властивість	Технологічне значення	Вплив на інструмент
Висока твердість	Підвищений опір руйнуванню матеріалу	Зростає навантаження на алмазні зерна
Абразивність	Інтенсивне стирання металевої зв'язки та алмазів	Прискорюється зношування сегментів
Зернисто-кристалічна структура	Нерівномірне руйнування окремих мінеральних зерен	Виникає змінне навантаження на напайки
Крихкий характер руйнування	Матеріал схильний до мікросколювання	Потрібні стабільна подача і жорсткий інструмент
Добра поліруваність	Після різання потрібна якісна поверхня для подальшої обробки	Необхідно мінімізувати сколи й хвилястість різку

1.2 Способи обробки природного каменю

Технологічні процеси обробки каменю призначені для надання заготовкам необхідної форми, розмірів і фактури поверхні. За [1] вибір технологічної схеми залежить від властивостей породи, типу блоків, номенклатури продукції та можливості раціонального використання відходів. У загальному випадку обробка каменю включає наближену обробку, точну обробку за формою і розмірами та фактурне оздоблення поверхні.

До механічних способів належать розпилювання, сколювання, фрезерування, шліфування, полірування, бучардування та інші процеси. До фізико-технічних належать гідроабразивна, термогазоструминна, плазмова, лазерна та інші спеціальні види обробки. Для даного проєкту головне значення

має різання, оскільки саме воно визначає навантаження на фрезу і вимоги до її конструкції.



Рисунок 1.1 – Основні способи обробки природного каменю [1]

Таблиця 1.2 – Основні способи обробки природного каменю

Спосіб	Сутність операції	Інструмент або обладнання	Результат
Розпилювання	Поділ блока, плити або бруска на заготовки	Штрипсові, дискові, канатні, стрічкові пили	Плити, бруски, деталі заданих розмірів
Фрезерування	Видалення шару матеріалу та формоутворення	Алмазні торцеві, обкантовувальні, профілювальні фрези	Пази, фаски, уступи, профілі
Шліфування	Вирівнювання поверхні	Шліфувальні круги, головки, бруски	Зменшення шорсткості
Полірування	Оздоблювальна обробка	Полірувальні круги та головки	Декоративна блискуча поверхня

Бучардування	Формування шорсткої фактури	Бучарди, спеціальні головки	Протиковзка або декоративна поверхня
Гідроабразивна та лазерна обробка	Спеціалізоване локальне руйнування	Струмінь води високого тиску, лазер	Контур або фактура спеціального призначення

Розпилювання є одним з найбільш трудомістких процесів каменеобробки, оскільки воно формує початкову геометрію деталей і впливає на якість подальших операцій. Тому вибір фрези або пилки для різання граніту має розглядатися не ізольовано, а у зв'язку з усім технологічним маршрутом виготовлення виробу.

1.3 Різальні інструменти для каменеобробки

Різальний інструмент для каменеобробки класифікують за видом несучої основи, способом закріплення різальних елементів і характером взаємодії з каменем. У [1] наведено поділ інструментів на абразивні, алмазні та твердосплавні. Штрипсові та дискові пили належать до жорсткого інструменту, а канатні, стрічкові й барові пили – до гнучкого інструменту.

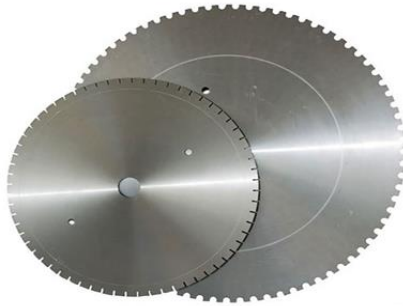
До основних інструментів належать штрипсові пили, алмазно-штрипсові пили, дискові та алмазно-дискові пили, канатні та алмазно-канатні пили, алмазно-стрічкові пили, барові пили, фрези, шліфувально-полірувальні круги й головки.



а)



б)



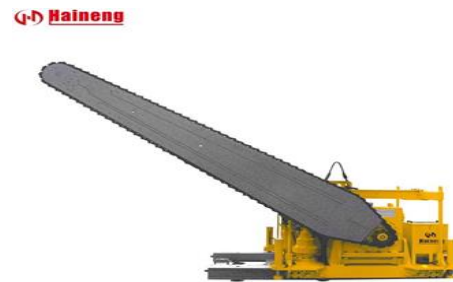
в)



г)



д)



е)



ж)



з)

Рисунок 1.2 Різальні інструменти для каменеобробки: а – штрипсові пили; б – алмазно-штрипсові пили; в – дискові алмазні пили; г – алмазно-канатні пили; д – алмазно-стрічкові пили; е – барова пила; ж – алмазні фрези та головки; з – шліфувально-полірувальні круги

Таблиця 1.3 – Порівняння різальних інструментів для каменеобробки

Інструмент	Основне призначення	Переваги	Обмеження
Штрипсова пила	Розпилювання блоків на плити	Можливість одночасного отримання багатьох плит	Тривалий цикл обробки, потреба у великих блоках
Алмазно-штрипсова пила	Розпилювання твердих порід	Вища продуктивність порівняно зі сталевими штрипсами	Вимогливість до натягу і точності встановлення
Дискова пила	Прямолінійне різання плит і блоків	Висока швидкість різання, простіша конструкція верстата	Обмеження висоти блока діаметром диска
Алмазно-канатна пила	Різання великих блоків і масивів	Можливість роботи з великими габаритами	Менша точність поверхні порівняно з дисковим різанням
Алмазно-стрічкова пила	Точне або криволінійне різання	Можливість складного контуру	Менша придатність для масивного розпилювання
Барова пила	Видобування і глибоке різання	Значна глибина різання	Спеціалізоване застосування
Фреза	Різання, підрізування, профілювання	Поєднання різання і формоутворення	Потрібні жорсткий корпус і точне балансування
Шліфувально-полірувальний інструмент	Завершальна обробка поверхні	Формування фактури та блиску	Не призначений для основного розпилювання

З наведеного порівняння видно, що фреза займає проміжне місце між відрізним інструментом і формоутворювальним інструментом. Вона може виконувати не лише відрізання, а й профілювання, підрізування, формування

уступів та інших поверхонь. Саме тому в подальшому аналіз зосереджено на алмазному дисковому інструменті для різання граніту.

1.4 Алмазний дисковий інструмент і сегменти для різання граніту

Алмазний дисковий інструмент складається зі сталевого корпусу та алмазonoсної робочої частини. У технічному посібнику Diamond Products зазначено, що алмазна пилка є круглим сталевим диском з алмазною кромкою, яка може мати сегментне, суцільне або зубчасте виконання; у корпусі можуть бути пази, що покращують охолодження і дають можливість проходу води або повітря між сегментами [4].

За [1] алмазно-дискові пили поділяють на інструменти із суцільним та переривчастим ріжучим шаром. Суцільні диски забезпечують якісне різання крихких матеріалів, але мають обмеження за діаметром. Сегментні диски є найбільш поширеними для каменеобробки, оскільки можуть виготовлятися великих діаметрів, забезпечують виведення шламу та кращі умови охолодження.

Для проєктованої фрези приймається сегментна алмазна конструкція. Алмазна напайка є робочим елементом, у якому алмазні зерна закріплені металевою зв'язкою. Під час різання алмази виконують роль мікрорізців, а зв'язка поступово зношується і відкриває нові зерна. Якщо зв'язка надто м'яка, сегмент швидко втрачає ресурс; якщо надто тверда, нові зерна відкриваються повільно, і фреза втрачає ріжучу здатність.

Вміст алмазу в сегменті доцільно задавати як концентрацію алмазів. У посібнику [1] для алмазних сегментів наведено концентрації 25 % або 50 %, а також приклади багатошарових сегментів з різною концентрацією по шарах. Для дипломної фрези приймається концентрація алмазів 50 %, оскільки вона відповідає сегментному інструменту для обробки твердих порід і забезпечує достатній запас ріжучих зерен у робочому шарі.

Таблиця 1.4 – Прийняті параметри алмазних напайок

Параметр	Прийняте значення	Обґрунтування
Тип сегмента	Алмазна напайка для мокрого різання граніту	Відповідає умовам різання твердих природних каменів
Форма сегмента	Стала ширина 5,4 мм; профільоване заглиблення на робочій поверхні	Зменшує початкову площу контакту та сприяє припрацюванню зв'язки й розкриттю алмазних зерен
Розмір сегмента	33×20×5,4 мм	Прийнято за складальним креслеником і 3D-моделлю фрези Ø800 мм
Ширина сегмента	5,4 мм	Забезпечує пропи́л ширший за корпус товщиною 4,6 мм
Довжина сегмента по периферії	33 мм	Визначає довжину контакту та крок розміщення
Висота сегмента	20 мм	Задає запас робочого алмазоносного шару
Концентрація алмазів	50 %	Прийнято як типові значення для сегментного алмазного інструменту за [1]
Матриця сегмента	Металева зв'язка	Утримує алмазні зерна та забезпечує їх поступове відкривання
Кріплення до корпусу	Паяння срібним припоєм	Придатне для сегментів мокрого різання та ремонтпридатне
Охолодження	Водяне	Потрібне для зменшення температури і виведення шламу

У розробленій конструкції застосовано алмазний сегмент довжиною 33 мм, висотою 20 мм і сталою шириною 5,4 мм. На верхній робочій поверхні сегмента передбачено профільоване заглиблення. Воно зменшує початкову площу контакту з гранітом, підвищує локальний контактний тиск і сприяє швидшому припрацюванню металевої зв'язки та розкриттю алмазних зерен. Під час подальшого зношування профіль поступово вирівнюється, а сегмент працює всією робочою поверхнею.



Рисунок 1.4 – Дисконна фреза та алмазні напайки виробничого аналога

Фото виробничої фрези та напайок підтверджують сегментну будову інструмента. По периферії сталевго корпуса рівномірно розташовані алмазні сегменти, між якими залишаються проміжки для проходу води і шламу. Наявність проміжків також зменшує суцільне тертя і покращує стабільність роботи інструмента при різанні граніту.

1.4 Технологічна сутність різання граніту дисковою фрезою

Різання граніту дисковою фрезою здійснюється за рахунок обертання інструмента та відносного переміщення фрези і заготовки. У зоні контакту алмазні зерна вдавлюються в камінь, подряпають його, спричиняють мікротріщини, сколювання та подрібнення мінеральних зерен. У [1] процес різання гірських порід описано як руйнування матеріалу під дією різального елемента, що діє подібно до клина і штампа.

Під час різання значна частина енергії витрачається на руйнування каменю, тертя, нагрівання та утворення шламу. У дослідженні промислового різання граніту круглими пилами встановлено, що режим різання, зокрема глибина різання, подача та напрям різання, істотно впливає на споживану потужність процесу [6].

Основним кінематичним параметром круглої фрези є лінійна швидкість різання. Вона визначається зовнішнім діаметром фрези та частотою її обертання:

$$v = (\pi \cdot D \cdot n) / 60, \quad (1.1)$$

де v – лінійна швидкість різання, м/с;

D – зовнішній діаметр фрези, м;

n – частота обертання фрези, хв^{-1} .

Якщо необхідно визначити частоту обертання за заданою лінійною швидкістю, формулу (1.1) перетворюють до вигляду:

$$n = (60 \cdot v) / (\pi \cdot D). \quad (1.2)$$

Умовну площу перерізу шару, що знімається за один прохід, можна оцінити за залежністю:

$$F = b \cdot t, \quad (1.3)$$

де F – умовна площа перерізу шару, мм^2 ;

b – ширина пропилю або робоча ширина сегмента, мм ;

t – глибина різання за один прохід, мм .

Для орієнтовної оцінки навантаження приймається робоча ширина пропилю $b = 5,4 \text{ мм}$. При глибині проходу $8\text{--}12 \text{ мм}$ умовна площа перерізу шару становить $43,2\text{--}64,8 \text{ мм}^2$. За прийнятої глибини $t = 10 \text{ мм}$ одержуємо

$$F = 5,4 \cdot 10 = 54 \text{ мм}^2.$$

Збільшення ширини пропилю або глибини різання підвищує навантаження на сегменти, потребу в охолодженні та ймовірність погіршення якості поверхні.



Рисунок 1.5 – Процес різання граніту дисковою фрезою



Рисунок 1.6 – Гранітні деталі після різання дисковою фрезою

Після різання заготовка повинна мати рівну площину та мінімальні сколи по крайках. Якщо фреза має підвищене биття, недостатню жорсткість або працює без стабільної подачі води, на поверхні різку можуть виникати хвилястість, підвищена шорсткість і нерівномірний слід від сегментів.

1.6 Верстати для різання граніту дисковим інструментом

Для різання граніту дисковим інструментом застосовують каменерізні верстати мостового, порталного, консольного та багатодискового типів.

У [1] зазначено, що дискові каменерізні верстати забезпечують значну швидкість різання, відносну конструктивну простоту і врівноваженість інерційних сил під час роботи. Водночас обмеженням є коефіцієнт використання діаметра диска та значна енергоємність процесу.

Дискове розпилювання дає змогу контролювати декоративність і дефектність каменю безпосередньо під час розкрою. На відміну від рамних штрипсових верстатів, дискові верстати можуть ефективно працювати не лише з великими блоками, а й з блоками меншого розміру та плитами різної товщини. Це особливо важливо для виробництва сходинок, бортового каменю, цокольних плит, облицювальних і архітектурних деталей.

Робочим інструментом дискових верстатів можуть бути диски, армовані твердими сплавами, абразивні диски та алмазні сегментні диски. Для різання граніту найбільш поширені саме алмазні сегментні інструменти, оскільки вони забезпечують високу швидкість різання та достатню стійкість при роботі з твердими породами.

Основними перевагами дискових каменерізних верстатів є висока продуктивність, можливість обкантовування, простіша конструкція порівняно з рамними верстатами та можливість швидкого налаштування на різні заготовки. До недоліків належать обмеження висоти блока діаметром диска, шум, енергоємність процесу та потреба у стабільному водяному охолодженні.



Рисунок 1.7 – Мостовий напівавтоматичний верстат для різання граніту дисковою фрезою

На рис. 1.7 показано виробничий мостовий напівавтоматичний верстат, який використано як аналог для аналізу умов роботи фрези. На фото видно головний електродвигун, пасову передачу, шпиндельний вузол, дискову фрезу великого діаметра, систему подачі води та гранітну заготовку у робочій зоні.

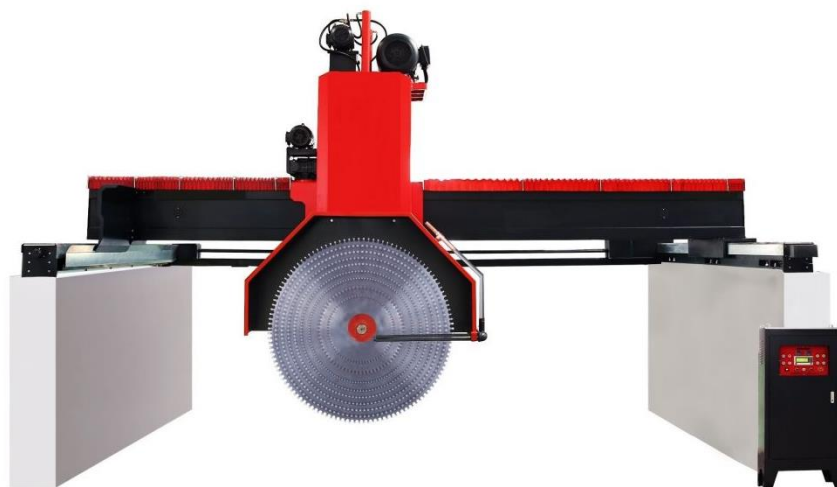


Рисунок 1.8 – Багатодисковий мостовий верстат SQC-2500-4D для розпилювання каменю [9]

Для підвищення продуктивності застосовують багатодискові мостові верстати. Вони можуть формувати кілька паралельних пропилів за один робочий цикл, що доцільно при серійному виготовленні плит, сходинок і однотипних деталей. Такі верстати потребують більшої потужності привода, точного

налаштування взаємного положення дисків і стабільної подачі води до кожного інструмента.

Таблиця 1.5 – Порівняння дискових каменерізних верстатів

Тип верстата	Основне призначення	Переваги	Обмеження
Однодисковий мостовий	Різання блоків, плит, сходинок, окремих заготовок	Універсальність, простіше налаштування, можливість індивідуального розкрою	Менша продуктивність порівняно з багатодисковими верстатами
Багатодисковий мостовий	Серійне розпилювання плит і однотипних деталей	Кілька паралельних пропилів за один цикл, висока продуктивність	Більша потужність привода, складніше налаштування, вища вартість
Портальний дисковий	Різання великих блоків і масивних заготовок	Висока жорсткість конструкції та стійкість робочого вузла	Значні габарити, складніше транспортування й монтаж

Пропозиції щодо подальшого застосування та вдосконалення обладнання

Порівняння однодискового виробничого верстата з багатодисковим мостовим верстатом SQC-2500-4D показує, що вибір обладнання має здійснюватися з урахуванням номенклатури деталей, розміру виробничої партії та вимог до гнучкості технологічного процесу. Для одиничного і дрібносерійного виготовлення сходинок, плит, брусків, облицювальних та меморіальних деталей доцільно зберегти однодискову схему. Вона дає змогу швидко змінювати розміри розкрою, працювати із заготовками різної форми та виконувати окремі технологічні проходи без переналагодження комплекту дисків.

Подальше вдосконалення виробничого однодискового верстата доцільно спрямувати на підвищення стабільності режиму різання. Насамперед необхідно передбачити контроль фактичної частоти обертання шпинделя після пасової передачі, оскільки частота обертання електродвигуна не визначає безпосередньо швидкість фрези. Доцільним є застосування частотного перетворювача або ступінчастого регулювання передатного відношення, що дозволить узгоджувати колову швидкість із діаметром фрези, властивостями граніту та глибиною різання.

Окремим напрямом модернізації є удосконалення системи водяного охолодження. Вода повинна подаватися симетрично з обох боків диска безпосередньо в зону контакту сегментів із каменем. Для контролю працездатності системи доцільно передбачити витратомір або датчик мінімальної подачі води, блокування запуску шпинделя за відсутності охолодження та можливість регулювання витрати залежно від глибини проходу. Таке рішення зменшує нагрівання сегментів, поліпшує видалення шламу і знижує ймовірність прискореного зношування алмазозносного шару.

Для підвищення точності розкрою рекомендується контролювати радіальне і торцеве биття фрези після її встановлення на шпиндель, а також періодично перевіряти стан підшипникових опор, фланців і пасової передачі. Доцільно застосувати окреме контрольне пристосування з оправкою та індикаторними головками. Результати контролю потрібно враховувати під час установа фрези, оскільки биття спричиняє нерівномірне навантаження сегментів, хвилястість поверхні різу, сколи крайок і скорочення ресурсу інструмента.

Багатодисковий SQC-2500-4D доцільно розглядати як варіант розвитку виробництва за умови переходу до серійного випуску плит або однотипних деталей. Його застосування потребує попереднього групування замовлень за однаковою товщиною, підготовки комплекту дисків з узгодженими діаметрами та биттям, налаштування міждискової відстані і забезпечення значної витрати

охолоджувальної води. Економічна доцільність такого обладнання визначається завантаженням верстата: за невеликих і різнотипних замовлень перевага високої продуктивності не компенсує складності переналагодження та більших енергетичних витрат.

Отже, для поточних умов виготовлення різнотипних гранітних деталей основним напрямом є модернізація однодискового мостового верстата та адаптація до нього проєктованої фрези. Перехід до багатодискової схеми слід передбачати як перспективний етап розширення виробництва після формування стабільної серійної номенклатури. За такого підходу однодисковий верстат забезпечує технологічну гнучкість, а багатодисковий — резерв підвищення продуктивності.

1.7 Вихідні технічні дані та режими різання фрези Ø800 мм

Дипломна фреза діаметром 800 мм розглядається як дисковий інструмент для мостових каменерізних верстатів, що мають відповідний посадковий вузол, достатню потужність привода, допустиму частоту обертання шпинделя та систему водяного охолодження. Режими різання у роботі визначаються для фрези Ø800 мм, а виробнича фреза Ø1600 мм використовується як аналог для оцінки колової швидкості, умов охолодження та загальної сегментної конструкції.

Як виробничий аналог прийнято фрезу діаметром 1600 мм, яка застосовувалася на мостовому напівавтоматичному верстаті для різання граніту. Вона мала 92 алмазні сегменти розміром 9×24×20 мм. Ці дані характеризують реальні умови експлуатації великогабаритного дискового інструмента, але не переносяться безпосередньо на конструкцію дипломної фрези. Для фрези Ø800 мм геометрія сегмента прийнята за фактичною 3D-моделлю і складальним креслеником.

Для проєктованої фрези Ø800 мм прийнято 46 алмазних сегментів розміром 33×20×5,4 мм зі спеціальним профільованим заглибленням на робочій поверхні. Довжина сегмента по периферії становить 33 мм, висота алмазонасної частини — 20 мм, а стала ширина — 5,4 мм. Перевищення ширини сегмента над товщиною корпуса 4,6 мм утворює боковий зазор у пропилі. Сегменти рівномірно розташовуються по периферії та припаюються до корпуса срібним припоєм.

Таблиця 1.6 – Порівняння виробничої та дипломної фрези

Параметр	Виробнича фреза	Дипломна фреза
Діаметр фрези	1600 мм	800 мм
Кількість алмазних сегментів	92 шт.	46 шт.
Розмір сегмента	33×20×5,4 мм	33×20×5,4 мм
Концентрація алмазів	50 %	50 %
Тип сегмента	Алмазна напайка з металевою зв'язкою	Алмазна напайка з металевою зв'язкою
Кріплення сегментів	Паяння срібним припоєм	Паяння срібним припоєм
Ширина сегмента	5,4 мм	6 мм
Товщина корпуса	За виробничим зразком	4,6 мм
Посадковий отвір	120 мм	90 мм
Охолодження	Водяне	Водяне

Спочатку за виробничим аналогом визначається лінійна швидкість різання, яка приймається як орієнтир для дипломної фрези. Для фрези Ø1600 мм з частотою обертання 340 хв⁻¹ лінійна швидкість становить:

$$v = (3,14 \cdot 1,6 \cdot 340) / 60 = 28,5 \text{ м/с.}$$

Основний розрахунок режиму різання виконується для дипломної фрези Ø800 мм. При збереженні орієнтовної колової швидкості виробничого аналога $v = 28,5$ м/с необхідна частота обертання дорівнює:

$$n = (60 \cdot 28,5) / (3,14 \cdot 0,8) = 681 \text{ хв}^{-1}.$$

Розрахункова частота обертання фрези Ø800 мм становить приблизно

681 хв⁻¹. З урахуванням прийнятого режиму та можливості регулювання шпинделя для подальших розрахунків приймається $n \approx 700$ хв⁻¹. За цього значення фактична колова швидкість становить близько 29,3 м/с. Глибина різання за один прохід приймається 8–12 мм, робоча подача — 0,4–0,8 м/хв, водяне охолодження є обов'язковим.

Таблиця 1.7 – Розрахункові параметри розміщення алмазних сегментів

Параметр	Фреза Ø1600 мм	Фреза Ø800 мм
Довжина кола по зовнішньому діаметру	5027 мм	2513 мм
Кількість сегментів	92 шт.	46 шт.
Довжина сегмента по периферії	24 мм	33 мм
Крок розміщення сегментів	54.6 мм	54,6 мм
Орієнтовний проміжок між сегментами	30.6 мм	21,6 мм
Частка кола, зайнята сегментами	43.9 %	60,4 %
Ширина сегмента	5,4 мм	6 мм

Розрахунок розміщення сегментів виконано для дипломної фрези Ø800 мм. За кількості 46 сегментів і довжини кожного сегмента 33 мм середній крок становить близько 54,6 мм, а орієнтовний проміжок між сусідніми сегментами — 21,6 мм. Такі проміжки забезпечують підведення води, виведення шламу та переривчастий контакт інструмента з гранітом.\

Таблиця 1.8 – Розрахункові режими різання дипломної фрези Ø800 мм

Параметр	Прийняте значення	Примітка
Лінійна швидкість різання	$\approx 29,3$ м/с	Фактичне значення при $n = 700$ хв ⁻¹
Частота обертання фрези Ø800 мм	≈ 700 хв ⁻¹	Розраховано за формулою (1.2)
Глибина різання за прохід	8–12 мм	За виробничими спостереженнями

Продовження таблиці 1.8

Ширина сегмента	5,4 мм	За сталою шириною сегмента
Умовна площа шару при $t = 10$ мм	54 мм ²	$F = 6 \cdot 10$
Охолодження	Водяне	Обов'язкове для мокрого різання граніту
Мінімальна подача води	не менше 30 л/хв	За виробничими умовами; за потреби збільшується
Матеріали оброблення	граніт, габро, Покостівський граніт	Тверді та абразивні породи
Робоча подача	0,4–0,8 м/хв	Прийняте значення для експлуатаційного режиму

1.8 Фактори якості різання та ресурсу фрези

Якість різання та ресурс фрези залежать від конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів. До конструктивних належать діаметр фрези, товщина корпусу, форма сегментів, їх кількість і крок розміщення, ширина напайок, точність посадкового отвору та спосіб кріплення сегментів. До технологічних належать якість виготовлення корпусу, термічна стабілізація, паяння, очищення, балансування та контроль биття. До експлуатаційних належать швидкість різання, подача, глибина проходу, охолодження, властивості граніту і стан верстата.

У роботі [6] показано, що подача, глибина різання та напрям різання є важливими факторами споживаної потужності при промисловому різанні граніту. Тому режим різання не можна призначати лише з міркувань продуктивності. Він має відповідати можливостям верстата, ресурсу сегментів, жорсткості фрези та умовам охолодження.

Для проєктованої фрези ключовими вимогами є забезпечення достатньої жорсткості сталевго корпусу, точності посадкового отвору, рівномірного

розміщення напайок, надійного паяного з'єднання та ширини сегмента, більшої за товщину корпусу. Така конструкція зменшує ризик тертя корпусу об стінки пропилу та підвищує стабільність роботи інструмента.

Таблиця 1.9 – Фактори, що впливають на якість різання та ресурс фрези

Фактор	Прояв у процесі	Можливий наслідок	Запобіжний захід
Швидкість різання	Визначає інтенсивність контакту сегментів з каменем	Перегрів або зниження продуктивності	Підбір частоти обертання за діаметром
Подача	Задає продуктивність руйнування матеріалу	Перевантаження, сколи, хвилястість різу	Узгодження подачі з потужністю верстата
Глибина різання	Збільшує площу шару, що руйнується	Підвищення навантаження на сегменти	Робота проходами 8–12 мм або менше при складному камені
Водяне охолодження	Охолоджує сегменти і вимиває шлам	Перегрів, засмічення пропилу, прискорений знос	Стабільна подача води в зону різання
Концентрація алмазів	Визначає кількість робочих зерен у сегменті	Недостатня ріжуча здатність або надмірна вартість	Прийняти концентрацію 50 % для граніту
Металева зв'язка сегмента	Керує відкриванням нових алмазних зерен	Засалювання або швидке зношування сегмента	Підібрати зв'язку під тверді й абразивні породи
Торцеве та радіальне биття	Порушує рівномірність контакту сегментів	Вібрації, сколи, нерівномірний знос	Контроль биття після виготовлення і паяння

Продовження таблиці 1.9

Якість паяння	Забезпечує з'єднання сегмента з корпусом	Відрив напайки, аварійний режим	Дотримання температурного режиму паяння срібним припоєм
---------------	--	---------------------------------	---

Таблиця 1.10 – Типові дефекти різання граніту та причини їх появи

Дефект	Ймовірна причина	Наслідок	Спосіб усунення
Сколи на крайках	Завелика подача, вібрації, зношені сегменти	Погіршення якості деталі	Зменшити подачу, перевірити стан фрези
Хвилястість різу	Торцеве биття, люфти верстата	Нерівна площина, потреба в додатковому шліфуванні	Контроль биття, перевірка шпинделя і напрямних
Перегрів сегментів	Недостатня подача води, засмічення пропилю	Прискорене зношування і втрата ріжучої здатності	Збільшити подачу води, очистити зону різання
Заклинювання фрези	Вузький пропил, перекіс заготовки, шлам у пропилі	Ризик пошкодження фрези та верстата	Правильне базування заготовки, промивання пропилю
Нерівномірний знос напайок	Радіальне биття, неоднакова висота сегментів, неправильне паяння	Зменшення ресурсу фрези	Контроль геометрії корпусу і сегментів

1.9 Висновки до розділу

У першому розділі розглянуто природний камінь як об'єкт механічного оброблення та встановлено, що граніт належить до твердих і абразивних порід,

різання яких потребує застосування алмазного інструменту. Показано, що властивості граніту безпосередньо впливають на навантаження, зношування сегментів, потребу у водяному охолодженні та вимоги до жорсткості фрези.

Проаналізовано способи обробки природного каменю та класифікацію різальних інструментів. Визначено, що серед розглянутих інструментів дискова алмазна фреза є доцільною для прямолінійного різання, підрізування і формоутворення гранітних деталей на каменерізному верстаті.

Розглянуто конструкцію алмазного дискового інструменту, що складається зі сталевго корпуса, посадкового отвору, алмазних сегментів, міжсегментних проміжків та паяних з'єднань. Для дипломної фрези прийнято 46 сегментів $33 \times 20 \times 5,4$ мм зі спеціальним профільованим заглибленням на робочій поверхні з концентрацією алмазів 50 %, металевою зв'язкою і кріпленням срібним припоєм. Ширина сегмента 6 мм перевищує товщину корпуса 4,6 мм і забезпечує формування пропила без контакту корпусу з боковими стінками різу.

2 КОНСТРУЮВАННЯ ДИСКОВОЇ ФРЕЗИ ДЛЯ РІЗАННЯ ГРАНІТУ

У цьому розділі обґрунтовується конструкція дискової алмазної фрези діаметром 800 мм. Вихідні параметри прийнято за результатами аналізу процесу різання граніту, виробничих умов експлуатації, складального кресленика та 3D-моделі. Основну увагу приділено конструкції сталевго корпуса, геометрії алмазних сегментів, їх розміщенню по периферії та узгодженню інструмента з мостовим каменерізним верстатом.

2.1 Вихідні дані для конструювання

Фреза призначена для прямолінійного різання гранітних плит і заготовок на мостовому каменерізному верстаті з водяним охолодженням. Під час роботи

корпус сприймає відцентрові сили, змінні навантаження від контакту сегментів із неоднорідною структурою граніту, тепловий вплив та згинальні навантаження, що виникають у разі нерівномірної подачі або відхилення фрези від площини різання. Тому конструкція повинна поєднувати достатню жорсткість із малою товщиною корпуса та забезпечувати стабільне положення сегментів.

Основні вихідні дані для конструювання наведено в таблиці 2.1. Значення узгоджено з презентаційними матеріалами, складальним креслеником і прийнятими режимами різання.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для конструювання дискової фрези

Параметр	Прийняте значення
Зовнішній діаметр фрези	800 мм
Діаметр корпуса по основі сегментів	близько 760 мм
Товщина корпуса	4,6 мм
Матеріал корпуса	сталь 65Г
Посадковий отвір	Ø90 мм
Додаткові отвори	2 отвори Ø25 мм
Кількість алмазних сегментів	46 шт.
Розмір сегмента	33×20×5,4 мм
Спосіб кріплення сегментів	паяння срібним припоєм
Прийнята частота обертання	близько 700 хв ⁻¹
Колова швидкість	близько 29,3 м/с
Глибина різання за прохід	8–12 мм
Робоча подача	0,4–0,8 м/хв
Охолодження	водяне, не менше 30 л/хв

Вихідні дані визначають габаритну й посадкову сумісність фрези з верстатом. Посадковий отвір Ø90 мм є основною конструкторською базою, відносно якої нормується положення зовнішнього контуру, сегментів і торцевих поверхонь. Два отвори Ø25 мм використовуються як допоміжні елементи установавання або передавання моменту залежно від конструкції фланцевого вузла верстата.

2.2 Обґрунтування конструктивної схеми фрези

Для різання граніту прийнято сегментну дискову конструкцію. Вона складається з плоского сталевого корпусу і рівномірно розташованих по периферії алмазних сегментів сталої ширини 5,4 мм. Порівняно із суцільним алмазозносним ободом сегментна схема створює проміжки для надходження води та видалення шламу, зменшує довжину безперервного контакту з каменем і полегшує відновлення інструмента шляхом перепаявання робочих елементів.

Зовнішній діаметр 800 мм прийнято з урахуванням габаритів мостового верстата, необхідної глибини різання та можливості отримання колової швидкості близько 29–30 м/с при частоті обертання приблизно 700 хв^{-1} . Зменшення діаметра порівняно з виробничим аналогом $\varnothing 1600$ мм знижує масу й відцентрові навантаження, однак обмежує максимальну глибину врізання. Для прийнятої технології це обмеження компенсується послідовним різанням проходами 8–12 мм.

Корпус виконує функції несучого елемента, центрування фрези на шпинделі та передавання крутного моменту до алмазних сегментів. Алмазні сегменти безпосередньо формують пропил. Їх стала ширина 5,4 мм перевищує товщину корпусу на 1,4 мм, тобто утворює сумарний боковий зазор близько 1,4 мм, або приблизно 0,7 мм з кожного боку за симетричного розміщення. Цей зазор зменшує тертя корпусу об граніт і ризик заклинювання фрези.

Конструктивну схему прийнято ремонтпридатною. Паяне кріплення дає можливість замінювати зношені або пошкоджені сегменти без виготовлення нового корпусу. Водночас якість пайки, однакова висота сегментів і точність їх радіального розташування безпосередньо впливають на биття та рівномірність навантаження.

2.3 Конструкція корпусу фрези

Корпус фрези виготовляється з листової сталі 65Г товщиною 4,6 мм. Сталь 65Г належить до пружинних марганцевистих сталей і застосовується для деталей, від яких потрібні пружність, опір змінним навантаженням і зносостійкість. У конструкції фрези ці властивості необхідні для збереження площинності диска та опору локальним деформаціям під час різання.

Основними конструктивними поверхнями корпусу є зовнішній контур із пазами під сегменти, посадковий отвір Ø90 мм, два допоміжні отвори Ø25 мм і плоскі торцеві поверхні. Посадковий отвір задає вісь обертання інструмента, тому його точність і взаємне положення із зовнішнім контуром мають визначальне значення для радіального биття. Торцеве биття залежить від площинності корпусу, точності фланцевого затиску та відсутності залишкового короблення після лазерного різання, термічної обробки й пайки.

Товщину корпусу 4,6 мм прийнято як компроміс між жорсткістю та шириною пропилу. Збільшення товщини підвищило б опір згину, але вимагало б ширших сегментів і призвело б до збільшення об'єму зруйнованого матеріалу. Надмірне зменшення товщини підвищило б ризик втрати площинності, виникнення торцевого биття і вібрацій. За ширини сегмента 5,4 мм прийнята товщина забезпечує необхідний боковий зазор.

Для зменшення концентрації напружень переходи між пазами та основним контуром корпусу повинні виконуватися без гострих внутрішніх кутів. Після лазерного різання необхідно видалити задирки, притупити гострі крайки та проконтролювати відсутність локальних підпалів, тріщин і значного викривлення. Остаточне положення сегментів контролюється відносно осі посадкового отвору.

Таблиця 2.2 – Функціональне призначення елементів корпусу

Елемент корпусу	Функціональне призначення	Основна вимога
Посадковий отвір Ø90 мм	Центрування фрези на шпинделі	Мінімальне радіальне відхилення відносно сегментного контуру
Два отвори Ø25 мм	Допоміжне базування або передавання моменту	Симетричне розташування відносно осі
Плоскі торцеві поверхні	Контакт із фланцями та забезпечення площини обертання	Площинність і відсутність короблення
Периферійні пази	Розміщення й опора алмазних сегментів	Однаковий крок і стабільна геометрія
Міжсегментні проміжки	Підведення води й видалення шламу	Відсутність гострих концентраторів напружень

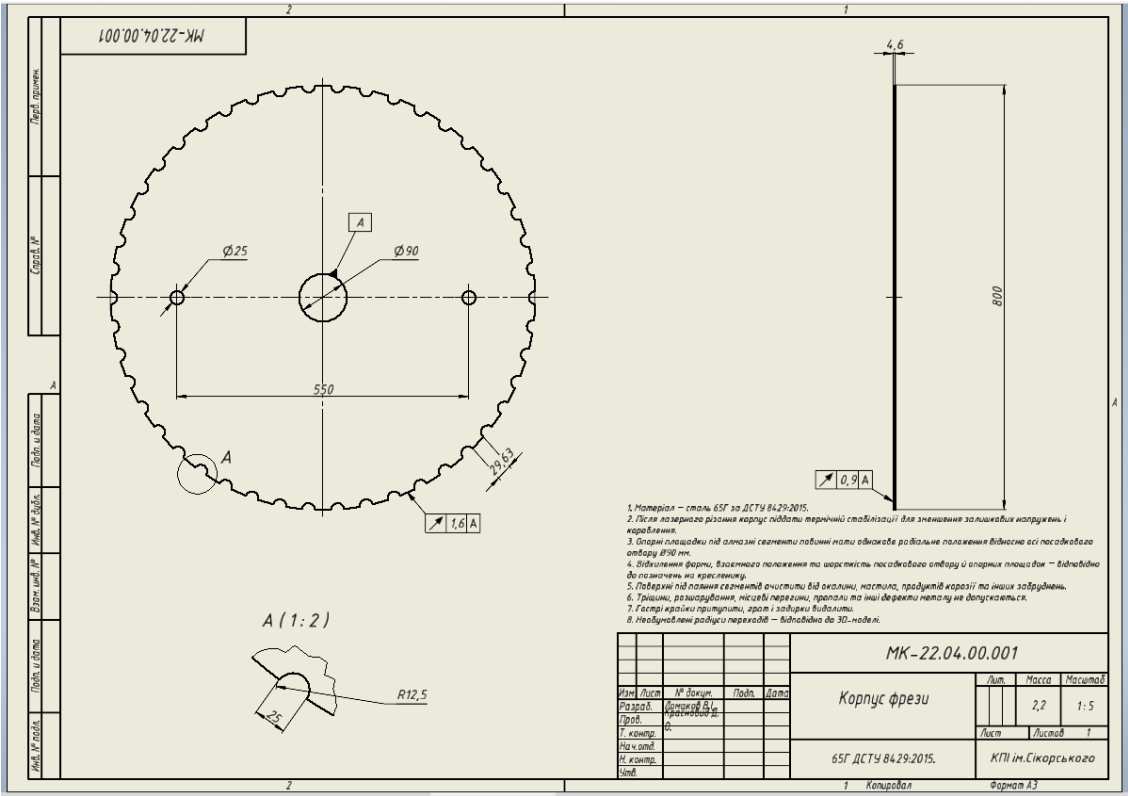


Рисунок 2.3 – Кресленник корпусу фрези

2.4 Конструкція та розміщення алмазних сегментів

У конструкції застосовуються алмазні сегменти довжиною 33 мм, висотою 20 мм і сталою шириною 5,4 мм. Алмазоносний шар складається із синтетичних алмазних зерен, закріплених у металевій порошковій зв’язці. Концентрацію алмазів прийнято 50 %. На робочій поверхні кожного сегмента виконано профільоване заглиблення, призначене для зменшення початкової площі контакту та прискорення розкриття алмазних зерен під час припрацювання. Ефективність такого профілю залежить від властивостей металевої зв’язки, режиму різання і стабільності водяного охолодження.

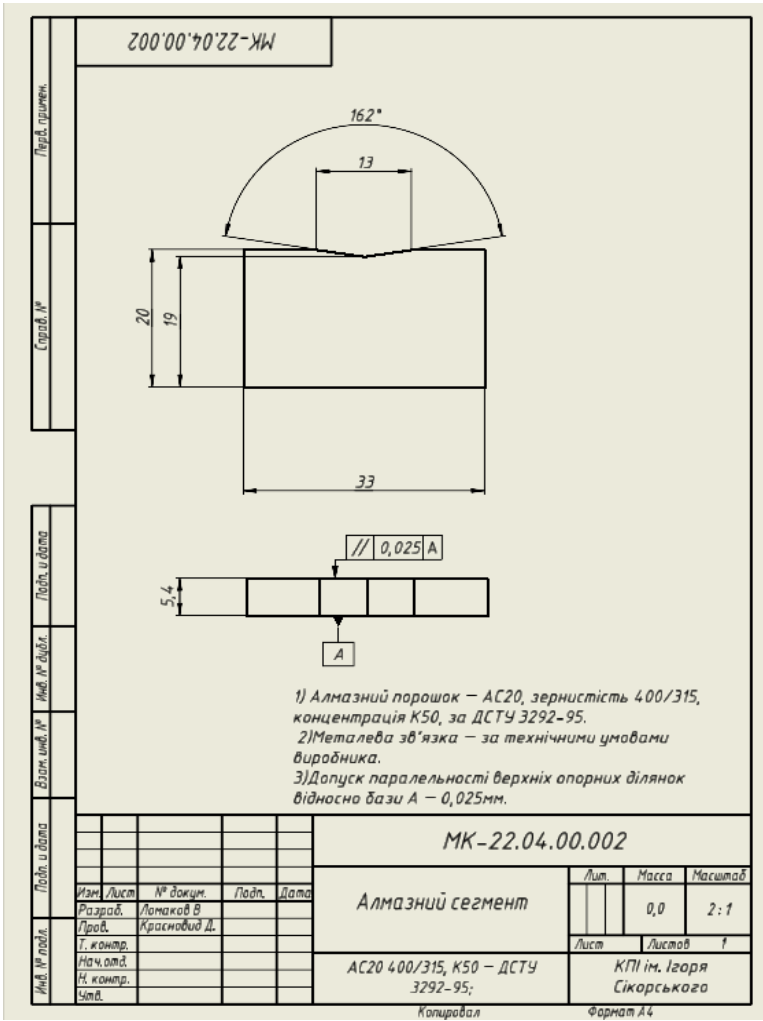


Рисунок 2.4 – Кресленик алмазного сегмента

Кількість сегментів становить 46. Довжина кола по зовнішньому діаметру фрези дорівнює:

$$L = \pi D = \pi \cdot 800 = 2513.274 \text{ мм.}$$

Середній крок розміщення сегментів визначається діленням довжини кола на їх кількість:

$$p = L / z = 2513.274 / 46 = 54.636 \text{ мм.}$$

За довжини сегмента 33 мм розрахунковий проміжок між сусідніми сегментами становить:

$$a = p - l = 54.636 - 33 = 21.636 \text{ мм.}$$

Отриманий проміжок забезпечує переривчастий характер контакту, надходження охолоджувальної води та винесення продуктів руйнування з пропилу. Рівномірний крок зменшує змінність навантаження за один оберт і полегшує балансування інструмента. Під час складання необхідно забезпечити однакову радіальну висоту сегментів і симетричне положення їх відносно середньої площини корпусу.

Наведені конструктивні рішення формують основу для подальшої перевірки міцності корпусу, оцінювання навантажень, вибору паяного з'єднання та розроблення технологічного процесу виготовлення фрези.

2.5 Розрахунок розміщення алмазних сегментів

Розміщення алмазних сегментів визначає рівномірність навантаження корпусу, періодичність контакту різальної частини з гранітом, умови надходження охолоджувальної води та видалення шламу. Розрахунок виконується по зовнішньому діаметру сталевго корпусу $D_k = 800$ мм, оскільки нижня поверхня сегментів припадає до його периферії. Повний робочий діаметр фрези після встановлення сегментів висотою 20 мм становить $D_p = 840$ мм.

Довжина кола встановлення сегментів визначається за формулою:

$$L_k = \pi D_k, \text{ мм}, \quad (2.1)$$

$$L_k = \pi \cdot 800 = 2513,274 \text{ мм.}$$

Кутовий крок між осями сусідніх сегментів за їх кількості $z = 46$ дорівнює:

$$\beta = 360^\circ / z, \quad (2.2)$$

$$\beta = 360^\circ / 46 = 7,826087^\circ.$$

Коловий крок між однойменними точками сусідніх сегментів визначається за формулою:

$$p = L_k / z, \text{ мм}, \quad (2.3)$$

$$p = 2513,274 / 46 = 54,636 \text{ мм.}$$

За довжини сегмента вздовж периферії $l = 33$ мм вільний проміжок між сусідніми сегментами становить:

$$a = p - l, \text{ мм}, \quad (2.4)$$

$$a = 54,636 - 33 = 21,636 \text{ мм.}$$

Сумарна довжина периферії, зайнята алмазними сегментами, визначається як:

$$L_c = z \cdot l, \text{ мм}, \quad (2.5)$$

$$L_c = 46 \cdot 33 = 1518 \text{ мм.}$$

Частка кола встановлення, зайнята сегментами, дорівнює:

$$\eta_c = (L_c / L_k) \cdot 100 \%, \quad (2.6)$$

$$\eta_c = (1518 / 2513,274) \cdot 100 = 60,399$$

Відповідно, частка відкритих міжсегментних проміжків становить 39,601 %. Рівномірний кутовий крок $7,826087^\circ$ забезпечує симетричний розподіл маси і навантаження по колу. Проміжок 21,636 мм використовується для надходження води до зони різання, виведення частинок зруйнованого граніту та зменшення безперервної площі контакту інструмента з матеріалом.

Таблиця 2.4 – Параметри розміщення алмазних сегментів

Параметр	Позначення	Значення
Діаметр корпусу	Dк	800 мм
Повний робочий діаметр	Dр	840 мм
Кількість сегментів	z	46
Довжина сегмента по периферії	l	33 мм
Довжина кола встановлення	Lк	2513,274 мм
Кутовий крок	β	7,826087°
Коловий крок	p	54,636 мм
Проміжок між сегментами	a	21,636 мм
Сумарна довжина сегментів	Lс	1518 мм
Частка кола, зайнята сегментами	η_c	60,399 %
Частка відкритих проміжків	100 – η_c	39,601 %

2.6 Обґрунтування геометрії, центрування та послідовності паяння сегментів

У конструкції фрези застосовано алмазні сегменти довжиною 33 мм, висотою 20 мм і сталою шириною 5,4 мм. Сегмент установлюють симетрично відносно серединної площини корпусу товщиною 4,6 мм, тому його боковий виступ становить 0,4 мм з кожного боку. На верхній робочій поверхні виконано профільоване заглиблення, яке зменшує початкову площу контакту з каменем і сприяє припрацюванню зв'язки та розкриттю алмазних зерен.

Боковий виступ сегмента з кожного боку корпусу визначається за формулою:

$$e = (b - \delta) / 2, \text{ мм}, \quad (2.7)$$

$$e = (5,4 - 4,6) / 2 = 0,4 \text{ мм}.$$

Профільоване заглиблення розташоване на верхній робочій поверхні сегмента і не змінює його сталої ширини 5,4 мм. Заглиблення зменшує початкову площу контакту, підвищує локальний тиск і сприяє швидшому розкриттю алмазних зерен під час припрацювання.

Отже, сегмент виступає на 0,4 мм з кожного боку корпусу. Симетричне центрування забезпечує однаковий боковий зазор із двох сторін полотна та виключає безпосередній контакт корпусу товщиною 4,6 мм зі стінками пропилу. Профільоване заглиблення впливає лише на характер початкового контакту робочої поверхні з гранітом і не змінює номінальної ширини сегмента.

Перед паянням корпус установлюють на центрувальну оправку і фіксують у площині. Кожний сегмент позиціонують по середині товщини корпусу з контролем однакового виступу по обидва боки. Для виключення накопичення похибки положення застосовують шаблон кутового кроку $7,826087^\circ$ або пристосування з 46 фіксованими позиціями.

Паяння виконують у два етапи за черговою схемою. На першому етапі припаюють 23 сегменти через один по всій периферії корпусу. Після завершення першої черги корпус охолоджують до температури навколишнього середовища. На другому етапі припаюють 23 сегменти, що залишилися у вільних позиціях. Така послідовність рівномірно розподіляє локальні зони нагрівання по колу, не допускає послідовного нагрівання сусідніх ділянок і зменшує ризик короблення полотна.

Після паяння контролюють положення кожного сегмента відносно серединної площини корпусу, рівномірність кутового кроку, зовнішній робочий діаметр 840 мм, радіальне биття по вершинах сегментів і торцеве биття корпусу. За наявності зміщення сегмента, неповного змочування припоєм або локальної деформації корпусу фрезу не допускають до експлуатації до усунення дефекту.

Таблиця 2.5 – Геометричні параметри встановлення сегмента

Параметр	Позначення	Значення
Товщина корпусу	δ	4,6 мм
Стала ширина сегмента	b	5,4 мм
Боковий виступ сегмента	e	0,4 мм з кожного боку

Продовження таблиці 2.5

Профіль робочої поверхні	—	Заглиблення для покращення розкриття алмазу
Кількість сегментів	z	46 шт.
Кількість сегментів першої черги паяння	z1	23
Кількість сегментів другої черги паяння	z2	23

Прийнята геометрія і схема встановлення забезпечують симетричну роботу фрези відносно її серединної площини. Рівномірний розподіл 46 сегментів, однакові бокові виступи та чергована послідовність паяння є обов’язковими умовами збереження геометричної точності корпусу і стабільності пропилу.

2.7 Паяне з’єднання алмазних сегментів із корпусом

Алмазні сегменти з’єднуються зі сталевим корпусом методом твердого паяння. На відміну від зварювання, під час паяння основний метал корпусу і сегмента не доводять до плавлення: з’єднання утворюється за рахунок розплавлення припою, його змочування підготовлених поверхонь і заповнення зазору між ними. Класифікацію та діапазони складу припоїв для твердого паяння встановлює ISO 17672:2024 [18]. Конкретну марку срібного припою в робочій документації необхідно призначати за сертифікатом виробника сегментів і технологічною інструкцією паяльної установки.

Перед паянням ділянку корпусу та опорну поверхню сегмента очищають від окалини, мастила, пилу й продуктів корозії. Підготовлені поверхні не повинні мати задирок, локальних вм’ятин або залишків абразиву. Флюс застосовують відповідно до обраної системи «основний метал – припій – спосіб нагрівання». Його завданням є руйнування оксидної плівки та захист поверхонь від

повторного окиснення під час нагрівання. Вимоги до чистоти поверхонь і стабільності зазору мають бути однаковими для всіх 46 позицій.

Номінальна геометрична площа контакту одного сегмента з корпусом визначається довжиною опорної поверхні $l = 33$ мм і її шириною $b_0 = 5,4$ мм:

$$A_1 = l \cdot b_0, \text{ мм}^2, \quad (2.8)$$

$$A_1 = 33 \cdot 5,4 = 178,2 \text{ мм}^2.$$

Сумарна номінальна площа контакту для 46 сегментів становить:

$$A_{\Sigma} = z \cdot A_1, \text{ мм}^2, \quad (2.9)$$

$$A_{\Sigma} = 46 \cdot 178,2 = 8197,2 \text{ мм}^2.$$

Наведена площа є геометричною. Фактична несуча площа паяного шва залежить від суцільності змочування та відсутності пор, непропаяних ділянок і сторонніх включень. Класифікацію характерних недосконалостей паяних з'єднань установлює ISO 18279:2023 [19]. Тому оцінювання якості не повинно обмежуватися лише наявністю видимого валика припою по краях сегмента.

Сегменти центрують відносно серединної площини корпусу. Паяння виконують у дві черги по 23 сегменти через один, після чого заповнюють проміжні позиції. Така схема не змінює геометричного кроку, але розносить зони локального нагрівання по колу. Після кожної черги контролюють площинність корпусу, положення сегментів і відсутність локальних деформацій.

До дефектів, за яких фрезу не допускають до наступної операції, належать зміщення сегмента відносно серединної площини, неповне змочування опорної поверхні, порожнини у шві, тріщини сегмента або корпусу, відшарування, а також деформація полотна. Після завершення паяння обов'язково виконують контроль радіального і торцевого биття та перевіряють збереження робочого діаметра 840 мм. Загальні вимоги безпечності до суперабразивних виробів, до яких належать алмазні різальні диски, встановлені ДСТУ EN 13236:2019 [11].

Таблиця 2.6 – Контрольовані параметри паяного з'єднання

Контрольований параметр	Прийнята вимога	Метод контролю
Положення сегмента	Симетрично відносно серединної площини корпусу	Шаблон, штангенінструмент
Боковий виступ сегмента	0,4 мм з кожного боку	Вимірювання з обох боків
Профіль робочої поверхні	Заглиблення виконане однаково на всіх сегментах	Візуальний контроль і шаблон
Суцільність паяного шва	Непропаяні ділянки та відшарування не допускаються	Візуальний контроль; додатковий метод за технологічною інструкцією
Положення по колу	Кутовий крок 7,826087°	Шаблон або позиційне пристосування
Стан корпусу після паяння	Відсутність видимого короблення і тріщин	Огляд, контроль биття та площинності

2.8 Матеріал корпусу та вимоги до термічної стабільності

Для корпусу фрези прийнято сталь 65Г. За класифікацією ДСТУ 8429:2015 вона належить до ресорно-пружинних вуглецевих і легованих сталей [12]. Виробник металопродукції характеризує 65Г як пружинну конструкційну сталь із підвищеною пружністю та міцністю [13]. Таке поєднання властивостей відповідає роботі тонкого дискового корпусу, який сприймає циклічні згинальні та теплові навантаження.

Нормований хімічний склад сталі 65Г містить 0,62–0,70 % вуглецю, 0,90–1,20 % марганцю та 0,17–0,37 % кремнію; вміст фосфору і сірки обмежується

значенням не більше 0,035 % кожного. Хром і нікель допускаються не більше 0,25 %, мідь — не більше 0,20 % [12], [13]. Підвищений вміст вуглецю і марганцю забезпечує здатність сталі до зміцнення, але одночасно підвищує чутливість тонкого полотна до температурних деформацій.

Корпус товщиною 4,6 мм вирізають із листової заготовки лазером. Після різання в крайовій зоні виникає термічно впливана ділянка, а нерівномірний нагрів по контуру може сформувати залишкові напруження. Додаткове локальне теплове навантаження виникає під час паяння 46 сегментів. Тому технологічний процес повинен передбачати операцію термічної стабілізації та проміжний контроль площинності.

Точний температурно-часовий режим термічної операції не задають довільно. Його необхідно призначити після уточнення стану поставки листа, вимог сертифіката на сталь, характеристик печі та допустимої твердості готового корпусу. У технологічній документації мають бути зазначені температура нагрівання, тривалість витримки, середовище й швидкість охолодження, а також критерії приймання після операції. До одержання цих вихідних даних у конструкторській частині фіксується функціональна вимога: після термічної операції корпус повинен зберігати площинність і не мати тріщин, окалини, яка перешкоджає паянню, або локальних перегинів.

Перед паянням посадкові ділянки корпусу очищають до металевого блиску. Після паяння не допускається виправлення геометрії ударним способом, оскільки воно створює додаткові залишкові напруження. Коригування технології повинно виконуватися зміною схеми нагрівання, режиму охолодження або способу фіксації корпусу в пристосуванні.

Таблиця 2.7 – Хімічний склад сталі 65Г за нормативними та виробничими даними [12], [13]

Елемент	Масова частка, %
C	0,62–0,70
Mn	0,90–1,20
Si	0,17–0,37
Cr	не більше 0,25
Ni	не більше 0,25
Cu	не більше 0,20
S	не більше 0,035
P	не більше 0,035

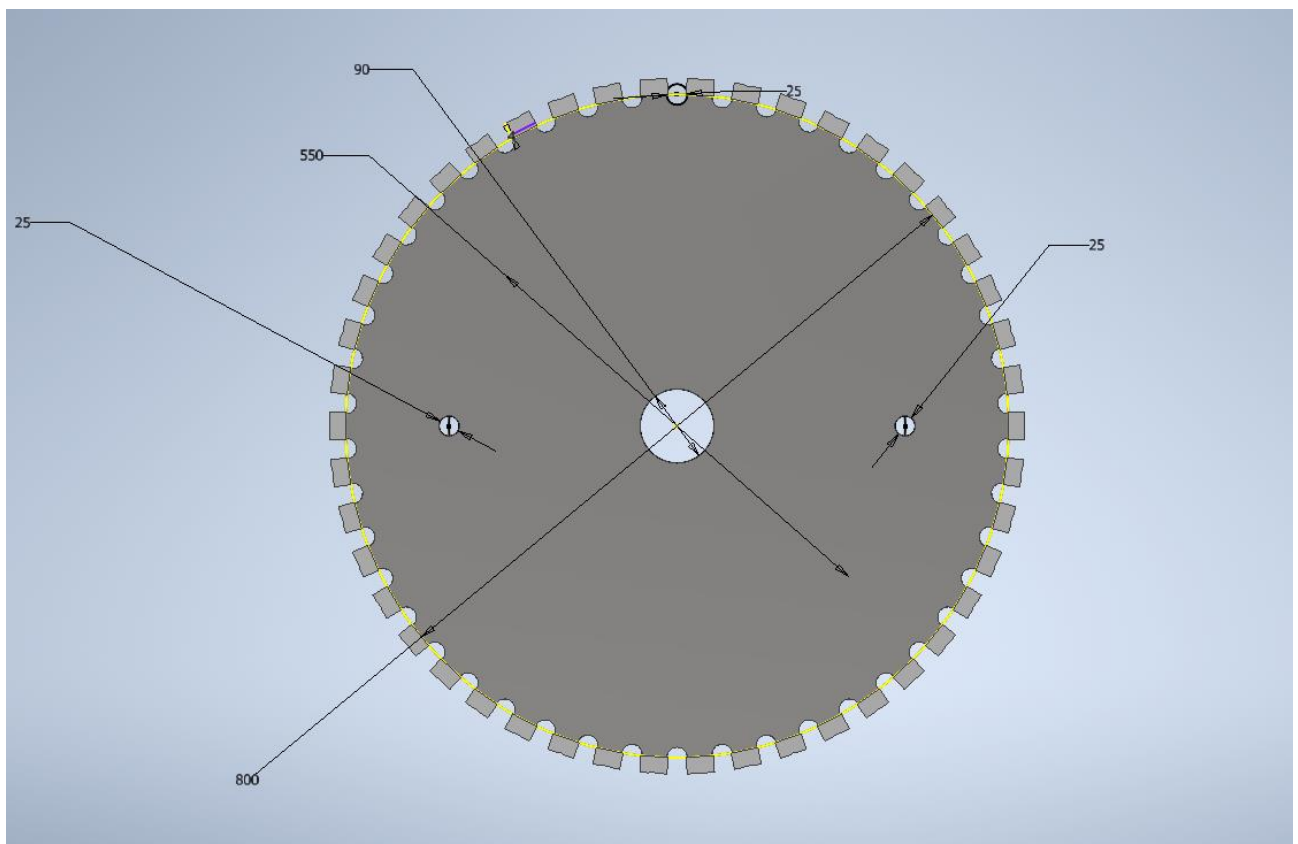


рисунок 2.6 – 3D-модель корпусу фрези та розташування сегментів

2.9 Вимоги до балансування фрези

Рівномірне розміщення сегментів не гарантує автоматичного балансування готової фрези. Дисбаланс може виникнути через відхилення маси окремих сегментів, нерівномірну кількість припою, зміщення сегментів, похибку посадкового отвору, локальне короблення корпусу або ремонт із заміною лише частини робочих елементів.

Статичний дисбаланс характеризують добутком неврівноваженої маси m на відстань e від її центра до осі обертання:

$$U = m \cdot e, \text{ г} \cdot \text{мм.} \quad (2.24)$$

Числове значення залишкового дисбалансу може бути визначене лише після вимірювання маси готової фрези, положення її центра мас і вимог балансувального обладнання. Тому в проєкті не вводиться довільний граничний показник. Після остаточного складання фреза підлягає статичному контролю, а за вимогою виробника верстата — динамічному балансуванню.

Балансування виконують після контролю биття. Якщо фреза має геометричну деформацію, її не можна балансувати додаванням або видаленням маси до усунення причини деформації. Коригування маси повинно виконуватися тільки в передбачених конструкцією зонах корпусу, без пошкодження посадкового отвору, сегментів і паяних швів.

Після перепаювання або заміни сегментів контроль балансування повторюють. Ця вимога пов'язана зі зміною масового розподілу по периферії та відповідає загальному принципу повторної перевірки безпечності відновлених суперабразивних виробів [11].

2.10 Технічні вимоги до готової фрези

Методику контролю радіального та торцевого биття, конструкцію спеціального контрольного пристосування і розрахунок його точності наведено

в розділі 4. У цьому підрозділі залишено лише вимоги до готової фрези, які підлягають перевірці під час приймального контролю.

За результатами конструкторського опрацювання основні параметри та вимоги до готової фрези зведено в таблицю 2.8. Частина значень визначена креслеником і виконаними розрахунками, інша частина встановлює умови приймального контролю.

Таблиця 2.8 – Основні технічні вимоги до дискової фрези

Параметр або вимога	Значення
Матеріал корпусу	Сталь 65Г за ДСТУ 8429:2015
Діаметр сталевих корпусу	800 мм
Зовнішній робочий діаметр	840 мм
Товщина корпусу	4,6 мм
Посадковий отвір	Ø90 мм
Допоміжні отвори	2 отвори Ø25 мм
Кількість сегментів	46 шт.
Геометрія сегмента	33×20×5,4 мм; профільоване заглиблення на робочій поверхні
Кутовий крок сегментів	7,826087°
Проміжок між сегментами по колу корпусу	21,636 мм
Спосіб кріплення	Тверде паяння срібним припоєм; марку уточнити за технологічною документацією
Центрування сегмента	Симетрично відносно серединної площини корпусу
Радіальне і торцеве биття	Не більше 1,6 мм за проєктним креслеником

Продовження таблиці 2.8

Якість паяного з'єднання	Тріщини, відшарування і непроаяні ділянки не допускаються
Стан крайок	Задирки видалити, гострі крайки притупити
Охолодження під час експлуатації	Безперервна подача води в зону різання
Нормативна база безпечності	ДСТУ EN 13236:2019

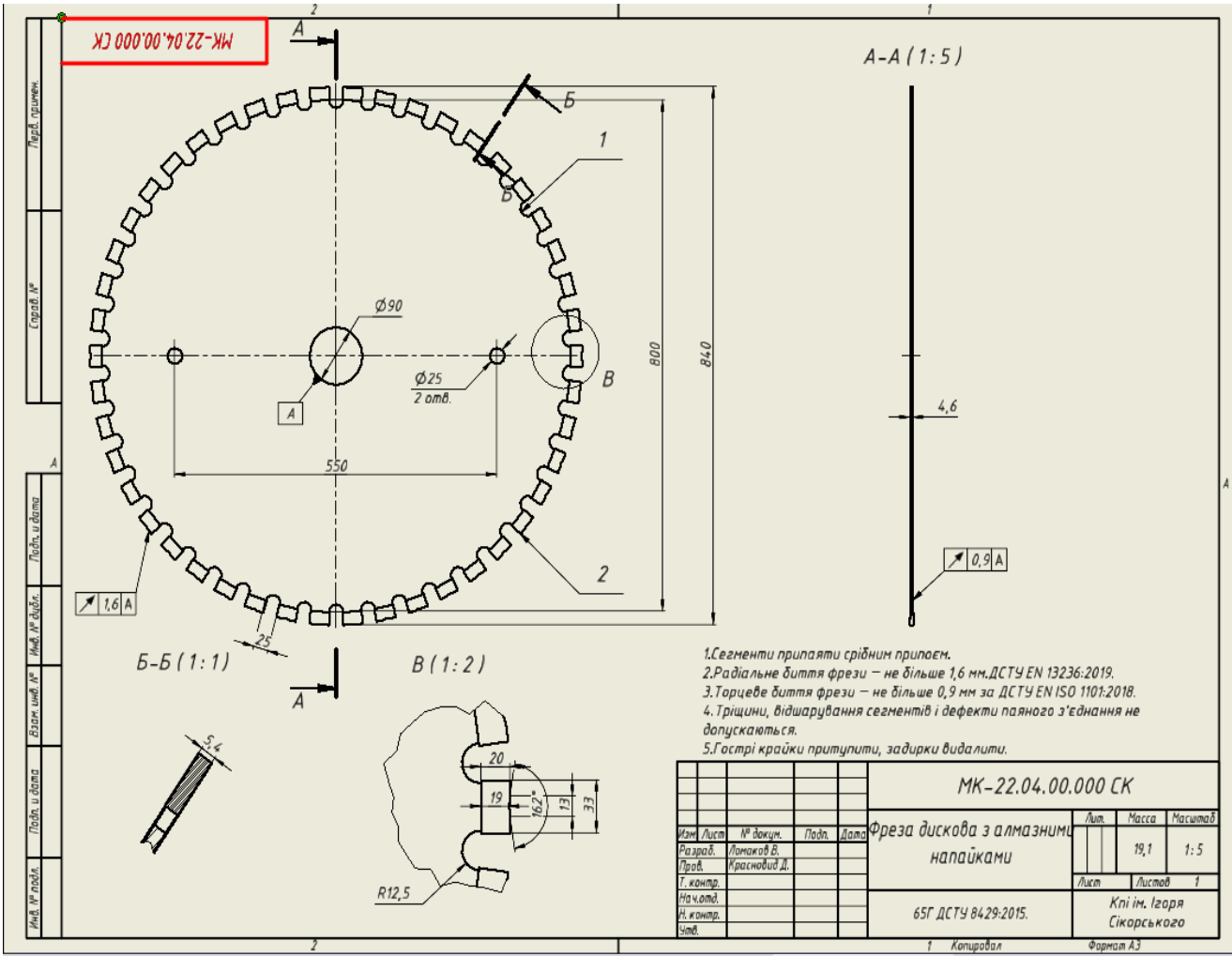


Рисунок 2.8 – Складальний кресленик дискової фрези

Висновки до розділу

У розділі обґрунтовано конструкцію дискової фрези з корпусом діаметром 800 мм і зовнішнім робочим діаметром 840 мм. Корпус товщиною 4,6 мм виготовляється зі сталі 65Г, а різальна частина утворена 46 сегментами розміром $33 \times 20 \times 5,4$ мм зі спеціальним профільованим заглибленням на робочій поверхні.

Підготовлені розрахунки й технічні вимоги є основою для розроблення складального кресленика, 3D-моделі та технологічного процесу виготовлення.

3 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДИСКОВОЇ ФРЕЗИ

3.1 Аналіз технологічності конструкції дискової фрези

Технологічність конструкції дискової фрези оцінюється з урахуванням матеріалу корпусу, геометрії заготовки, вимог до посадкового отвору, способу формування опорних площадок і технології кріплення алмазних сегментів. Корпус виготовляють зі сталі 65Г, яка належить до ресорно-пружинних сталей і після термічного впливу потребує контролю залишкових деформацій [12], [13].

Початковою заготовкою є круглий листовий елемент $\varnothing 820 \times 4,6$ мм. Після лазерного різання формують корпус $\varnothing 800$ мм, посадковий отвір $\varnothing 90$ мм, два допоміжні отвори $\varnothing 25$ мм і периферійні ділянки під 46 сегментів. Обрана конструкція дає змогу виконувати основні контури за одну установку на лазерному верстаті, а точність посадкового отвору забезпечувати подальшим внутрішнім шліфуванням. Алмазний сегмент має розміри $33 \times 20 \times 5,4$ мм і сталу ширину. На його верхній робочій поверхні передбачене профільоване заглиблення, яке зменшує початкову площу контакту з гранітом і сприяє припрацюванню металевої зв'язки та розкриттю алмазних зерен. Сегменти припаюють до попередньо прошліфованих опорних площадок. Якість паяного з'єднання визначається підготовкою поверхонь, стабільністю положення сегмента та відсутністю непропаяних ділянок і відшарувань [18], [19].

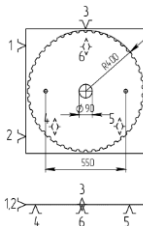
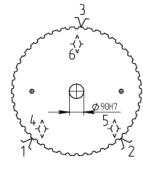
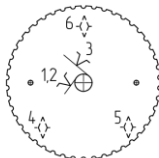
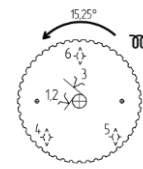
Послідовність операцій сформована так, щоб точні базові поверхні створювалися до операцій, у яких вони використовуються. Після лазерного різання і термічної стабілізації остаточно шліфують отвір $\varnothing 90$ мм. Далі цей отвір разом із торцевою поверхнею застосовують для базування корпусу під час шліфування опорних площадок, паяння сегментів і контрольної операції.

3.2 Базовий технологічний процес виготовлення дискової фрези

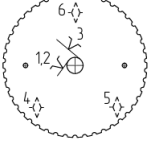
Базовий технологічний процес охоплює заготівельну, термічну, внутрішньошліфувальну, плоскошліфувальну, паяльну та контрольну операції. Для лазерного різання прийнято верстат MAST ML-3015eco з робочою зоною 3000×1500 мм і системою автоматичного фокусування; характеристики верстата дають змогу обробляти заготовку Ø820 мм [20]. Остаточну обробку посадкового отвору виконують на вертикальному шліфувальному верстаті з ЧПК JAINNHER JHV-1006CNC. Компанія Jainnher спеціалізується, зокрема, на внутрішньошліфувальних верстатах і автоматизованих шліфувальних системах [21]. Для оброблення опорних площадок прийнято Plattner SSRM2200-W, призначений для шліфування алмазних пил і спеціального алмазного інструмента діаметром до 2200 мм [22]. Паяння сегментів виконують на автоматичному стенді Ruisheng QZD-1400. За технічними даними виробника, обладнання призначене для дисків діаметром від 350 до 1400 мм, забезпечує автоматизований цикл і позиціонування сегментів; тому воно охоплює робочий діапазон проєктованої фрези Ø800/840 мм [23]. У таблиці 3.1 наведено послідовність операцій, базування, обладнання, пристосування та засоби контролю.

.

Таблиця 3.1 – Базовий технологічний процес виготовлення дискової фрези

№ операції	Найменування операції	Зміст операції	Базування	Обладнання та інструмент	Пристосування і засоби контролю
005	Заготівельна операція (лазерне різання)	Лазерне вирізання корпуса фрези з круглої листової заготовки Ø820 мм зі сталі 65Г товщиною 4,6 мм. Формування зовнішнього контуру корпуса Ø800 мм, посадкового отвору Ø90 мм, двох отворів Ø25 мм і периферійних ділянок під сегменти. Видалення ґрату, окалини та задирок.		Лазерний верстат з ЧПК MAST ML-3015 есо або аналог; лазерна головка; ручний інструмент для очищення крайок.	Робочий стіл верстата; упори; система фіксації листа; штангенциркуль.
010	Термічна операція	Термічне оброблення корпуса зі сталі 65Г для зняття внутрішніх напружень після лазерного різання, стабілізації геометрії та забезпечення необхідних механічних властивостей. Контроль відсутності тріщин і значного короблення.		Камерна електрична піч; пірометр або термопара; засоби контролю температури.	Термостійкий піддон; опорні рейки; контрольна плита; шупи.
015	Внутрішньошліфувальна операція	Остаточне шліфування посадкового отвору Ø90 мм. Забезпечення точності діаметра, циліндричності, шорсткості та співвісності отвору відносно зовнішнього контуру корпуса.		Вертикальний шліфувальний верстат з ЧПК JAINNHER JHV-1006CNC; внутрішньошліфувальний шпиндель; шліфувальний круг на оправці.	Кільцева планшайба; три регульовані радіальні упори для центрування за зовнішнім контуром Ø800 мм; низькопрофільні притиски; індикаторна стійка; індикаторний нутромір.
020	Плоскошліфувальна операція	Шліфування 46 опорних площадок на периферії корпуса під паяння алмазних сегментів. Після оброблення кожної площадки корпус повертають на кут 7,826087°. Забезпечують однакове радіальне положення, площинність і чистоту поверхонь під паяння.		Шліфувальний верстат Plattner SSRM2200-W; шліфувальний круг для оброблення опорних площадок.	Спеціальна центрувальна оправка Ø90 мм; опорний і притискний фланці; затискна гайка; ділильний механізм; установочний палець в отворі Ø25 мм.
025	Паяльна операція	Установлення і паяння 46 алмазних сегментів 33×20×5,4 мм по периферії корпуса срібним припоєм із застосуванням флюсу. Сегменти центрують відносно серединної площини корпуса. На робочій поверхні сегмента передбачене профільоване заглиблення для покращення припрацювання зв'язки та розкриття алмазних зерен. Паяння виконують із рознесенням зон нагрівання по колу.		Автоматичний паяльний стенд Ruisheng QZD-1400 (Fully Automatic Brazing Stand For Diamond Segments).	Центрувальна оправка Ø90 мм; опорний і притискний фланці; затискна гайка; автоматичний захват сегмента; радіальний упор; бокові напрямні; програмний ділильний механізм.

Продовження таблиці 3.1

030	Контрольна операція	Контроль зовнішнього і посадкового діаметрів, товщини та площинності корпусу, положення сегментів, якості паяних з'єднань, радіального і торцевого биття. Перевірка відсутності тріщин, відшарувань, короблення та залишків флюсу.		Контрольний стенд; індикатори годинникового типу; штангенциркуль; мікрометр; нутромір.	Контрольна оправка Ø90 мм з опорним і притискним фланцями; поворотний вузол; регульовані індикаторні стійки; два індикатори годинникового типу; штангенциркуль; мікрометр; індикаторний нутромір.
-----	---------------------	--	---	--	---

3.3 Вибір і розрахунок режимів різання дискової фрези

Розрахунок виконано для дискової фрези зовнішнім діаметром 800 мм із 46 алмазними сегментами. Вихідними режимними параметрами прийнято колову швидкість 28,5 м/с, робочу подачу 0,50 м/хв, глибину різання за один прохід 10 мм і ширину пропилу 5,4 мм. Значення подачі та глибини є прийнятими режимними параметрами для розрахункового випадку, а частота обертання, фактична колова швидкість, подача на один оберт, подача на один сегмент і продуктивність визначаються розрахунком.

Частота обертання, яка відповідає заданій коловій швидкості, визначається за формулою:

$$n_p = 60v / (\pi D), \text{ хв}^{-1}, \quad (3.1)$$

де $v = 28,5$ м/с — прийнята колова швидкість; $D = 0,800$ м — зовнішній діаметр фрези.

$$n_p = (60 \cdot 28,5) / (\pi \cdot 0,800) = 680,39 \text{ хв}^{-1}.$$

За результатом розрахунку для налаштування шпинделя приймається частота обертання $n = 700 \text{ хв}^{-1}$. Після прийняття цієї частоти фактична колова швидкість визначається за формулою:

$$v_f = \pi D n / 60, \text{ м/с}. \quad (3.2)$$

$$v_{\phi} = (\pi \cdot 0,800 \cdot 700) / 60 = 29.322 \text{ м/с.}$$

Отже, розрахунковому налаштуванню $n = 700 \text{ хв}^{-1}$ відповідає фактична колова швидкість $v_{\phi} = 29,322 \text{ м/с.}$

Подача на один оберт фрези визначається як відношення хвилинної подачі до частоти обертання:

$$s_0 = S / n, \text{ мм/об.} \quad (3.3)$$

$$s_0 = 500 / 700 = 0.714286 \text{ мм/об.}$$

Подача, що припадає на один алмазний сегмент, визначається з урахуванням кількості сегментів $z = 46$:

$$s_z = S / (n \cdot z), \text{ мм/сегмент.} \quad (3.4)$$

$$s_z = 500 / (700 \cdot 46) = 0.015528 \text{ мм/сегмент.}$$

Площа поперечного перерізу шару граніту, який руйнується під час одного проходу, визначається добутком ширини пропилу та глибини різання:

$$F = b \cdot t, \text{ мм}^2. \quad (3.5)$$

$$F = 5,4 \cdot 10 = 54 \text{ мм}^2.$$

Об'ємна продуктивність різання визначається за формулою:

$$Q = b \cdot t \cdot S, \text{ мм}^3/\text{хв.} \quad (3.6)$$

$$Q = 5,4 \cdot 10 \cdot 500 = 27000 \text{ мм}^3/\text{хв} = 27,000 \text{ см}^3/\text{хв.}$$

Частота входження сегментів у зону різання визначається добутком частоти обертання і кількості сегментів:

$$N_c = n \cdot z, \text{ сегментів/хв.} \quad (3.7)$$

$$N_c = 700 \cdot 46 = 32200 \text{ сегментів/хв} = 536.667 \text{ сегментів/с.}$$

Для розрахункового режиму приймається безперервне водяне охолодження з витратою 30 л/хв. Значення задається як експлуатаційна умова виробничого верстата і використовується під час подальшого аналізу теплового стану сегментів та видалення шламу.

Таблиця 2.3 – Розрахункові та прийняті параметри режиму різання

Параметр	Позначення	Значення	Характер значення
Зовнішній діаметр фрези	D	800 мм	задано конструкцією
Кількість сегментів	z	46	задано конструкцією
Розрахункова частота обертання	np	680,39 хв ⁻¹	розраховано за $v = 28,5$ м/с
Прийнята частота обертання	n	700 хв ⁻¹	прийнято для налаштування
Фактична колова швидкість	v _ф	29,322 м/с	розраховано для $n = 700$ хв ⁻¹
Робоча подача	S	0,50 мм/хв (500 мм/хв)	прийнято
Подача на один оберт	s _о	0,714286 мм/об	розраховано
Подача на один сегмент	s _з	0,015528 мм/сегмент	розраховано
Глибина різання за прохід	t	10 мм	прийнято
Ширина пропилу	b	5,4 мм	прийнято за сталою шириною сегмента
Площа перерізу шару	F	54 мм ²	розраховано
Об'ємна продуктивність	Q	27000 мм ³ /хв (27,000 см ³ /хв)	розраховано
Частота входження сегментів	N _c	32200 сегментів/хв (536,667 сегментів/с)	розраховано
Витрата охолоджувальної води	q _в	30 л/хв	прийнято за виробничою умовою

Розрахунок режиму різання встановлює однозначний зв'язок між геометричними параметрами фрези, частотою обертання шпинделя та

продуктивністю процесу. Прийняті значення $n = 700 \text{ хв}^{-1}$, $S = 0,50 \text{ м/хв}$, $t = 10 \text{ мм}$ і $b = 6 \text{ мм}$ надалі використовуються як вихідні дані для перевірки потужності привода, аналізу навантаження на корпус і оцінювання умов роботи паяного з'єднання.

Висновки до розділу

У розділі сформовано базовий технологічний процес виготовлення дискової фрези, визначено послідовність створення технологічних баз, прийнято обладнання для лазерного різання, внутрішнього шліфування, оброблення опорних площадок, паяння та контролю. Режими різання граніту перенесено до технологічного розділу як експлуатаційні параметри, що використовуються для перевірки працездатності виготовленої фрези.

4 КОНТРОЛЬНЕ ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ РАДІАЛЬНОГО ТА ТОРЦЕВОГО БИТТЯ

4.1 Призначення та вимоги до контрольного пристосування

Контрольне пристосування призначене для остаточної перевірки радіального биття робочої периферії та торцевого биття дискової фрези після паяння алмазних сегментів, очищення і повного охолодження. Необхідність такого контролю зумовлена тим, що похибки посадкового отвору, короблення корпусу, нерівномірність паяння та відхилення положення окремих сегментів можуть спричинити нерівномірний контакт інструмента з гранітом, вібрації, хвилястість поверхні різу і прискорене зношування робочих елементів.

За методичними вказівками [10] биття периферійних і торцевих поверхонь дисків доцільно контролювати на пристроях з обертовою оправкою. При цьому контрольований диск центрують за центральним отвором, закріплюють на оправці, а відхилення визначають за зміною показів індикаторних головок протягом одного або двох повних обертів. Така схема використана як основа для розробленого пристосування, але його габарити та установочні елементи адаптовано до фрези з посадковим отвором Ø90 мм і робочим діаметром 840 мм.

Основними вимогами до пристосування є: надійне та відтворюване базування фрези; обертання без відчутного люфту; можливість підведення індикаторів до периферійної і торцевої поверхонь; захист вимірювальних головок від ударів під час установлення фрези; зручність регулювання; достатня жорсткість основи та стояків; можливість перевірки фрези за одну установку. Загальні принципи застосування геометричних допусків, зокрема

радіального і торцевого биття, визначає ISO 1101:2017 [24], а загальні метрологічні вимоги до засобів GPS-вимірювань — ISO 14978:2018 [25].

4.2 Конструкція та принцип дії пристосування

Пристосування змонтоване на жорсткій прямокутній основі габаритами 2100×1600 мм. У центральній частині розташований поворотний вузол з вертикальною оправкою. Фреза встановлюється горизонтально, тому її посадковий отвір суміщається з віссю оправки, а торцева поверхня спирається на опорний фланець. Зверху фреза затискається притискним фланцем і різьбовим елементом. Така конструкція забезпечує спільне обертання фрези з оправкою і дає змогу контролювати її геометрію відносно осі посадкового отвору.

Для контролю передбачено регульовані індикаторні вузли. Радіальний індикатор підводиться до зовнішньої робочої поверхні алмазних сегментів у напрямку радіуса. Торцевий індикатор встановлюється перпендикулярно до бокової поверхні корпусу на максимально можливому радіусі, але поза паяним швом. Положення вимірювальних головок регулюється переміщенням стояків і кронштейнів; після налаштування вони фіксуються затискними елементами. Відвідні або шарнірні вузли дають змогу прибирати наконечники із зони встановлення, щоб не пошкодити індикатори під час монтажу та знімання фрези.

Таблиця 4.1 – Основні елементи контрольного пристосування

ПОЗИЦІЯ	ПОЗНАЧЕННЯ	ОПИС	К-СТЬ
1	Основа	Основа, на якій центрується диск	1
2	Кронштейн	Шайба зі сферичною поверхнею для забезпечення самоствановлення	1
3	Гвинт	Гвинт для закріплення диска	1
4	Втулка		1
5	Гвинт	Гвинт для закріплення індикаторної виміральної головки (ІГ) 6 через втулку 7	1
6	Індикаторна вимірвальна головка ІЧ-10 ДСТУ 577:2009,		1
7	Втулка	Втулка для закріплення індикаторної головки 6 гвинтом 5	1
8	Прокладка	Прокладка, через яку нужна кінцева частина оправки притерта у втулці 16	1
9	Підставка	-	-
10	Упорний гвинт	Гвинт для регулювання положення листви з ІГ 6	1
11	Гайка	Гайка для регулювання положення листви з ІГ 6	1
12	Стояк підставки	Стояк, на якому закріплена індикаторна головка 6 та рухома листва 18	1
13	Гайка	Гайка для закріплення втулки 16 у корпусі 17	1
14	Оправка	Обертова оправка для центрування диска	1
15	Гайка	Гайка для закріплення оправки 14	1
16	Втулка	Втулка, в якій розташована оправка 14	1
17	Корпус	Корпус пристрою, в якому встановлена втулка 16	1
18	Рухома листва	Листва, на якій встановлена ІГ 6, закріплена на стояку підставки 12	1
19	Шарнірний важіль	Важіль для відведення згору листви з ІГ 6 для знаття передвіреного диска	1

4.3 Базування та закріплення фрези

Перед контролем поверхні оправки, опорного фланця та посадкового отвору фрези очищають від пилу, залишків флюсу й абразивних частинок. Фрезу встановлюють на оправку по отвору Ø90 мм до контакту з опорним торцем. Посадковий отвір формує основну вимірювальну вісь, а торцева поверхня визначає осьове положення фрези. Після встановлення накладають притискний фланець і рівномірно затягують гайку без надмірного зусилля, щоб не деформувати тонкий корпус товщиною 4,6 мм.

Установочна база та вимірювальна база в цій схемі суміщені: радіальне й торцеве биття оцінюють відносно тієї самої осі посадкового отвору, за якою фреза центрується на оправці. Це зменшує похибку базування. Для усунення впливу зазору між оправкою і отвором застосовується точна або слабкоконічна посадочна поверхня; перед початком вимірювання власне биття оправки та опорного фланця перевіряють окремо.

4.4 Методика контролю радіального і торцевого биття

Після закріплення фрези радіальний індикатор встановлюють так, щоб його наконечник контактував із зовнішньою робочою поверхнею сегментів приблизно по середині їх ширини. Вимірювальний стрижень орієнтують у радіальному напрямку і створюють невеликий попередній натяг. Шкалу встановлюють на нуль або фіксують початкове показання. Фрезу повільно повертають щонайменше на один повний оберт, реєструючи найбільше і найменше показання індикатора. Радіальне биття визначають за залежністю:

$$\Delta r = I_{\max,r} - I_{\min,r}, \text{ мм}, \quad (4.1)$$

де $I_{\max,r}$ та $I_{\min,r}$ — відповідно найбільше і найменше показання радіального індикатора за один повний оберт фрези.

Для контролю торцевого биття наконечник другого індикатора підводять до бокової поверхні корпусу на постійному радіусі, максимально наближеному до периферії, але поза зоною припою. Вимірювальний стрижень орієнтують паралельно осі оправки. Після повного оберту фрези торцеве биття визначають як:

$$\Delta t = I_{\max,t} - I_{\min,t}, \text{ мм}, \quad (4.2)$$

де $I_{\max,t}$ та $I_{\min,t}$ — найбільше і найменше показання торцевого індикатора. За необхідності вимірювання повторюють на іншому радіусі або з протилежного боку корпусу. Для зменшення випадкової складової рекомендовано виконати не менше трьох повних циклів і прийняти найбільше отримане значення. Індикатор із ціною поділки 0,01 мм є достатньо чутливим для такого контролю; прилади цього класу серійно випускаються, зокрема, Mitutoyo [26].

Фреза вважається придатною, якщо отримані значення не перевищують проєктної вимоги 1,6 мм. Це значення використовується як вимога конкретного складального кресленика, а не як універсальна межа стандарту. У разі перевищення допуску перевіряють чистоту базових поверхонь, затиск, власне биття оправки, положення сегментів і короблення корпусу; після усунення причини контроль повторюють.

4.5 Розрахунок точності контрольного пристосування

Розрахунок виконано за методикою [10]. Загальна похибка контрольного пристосування залежить від похибки розташування фрези, похибки передатного механізму, похибки еталона та власної похибки індикатора. Для прийнятої схеми передатний механізм відсутній, оскільки наконечник індикатора безпосередньо контактує з контрольованою

поверхнею. Окремий еталонний розмір також не використовується, адже визначається різниця максимального й мінімального показань за оберт.

Похибку розташування фрези визначаємо за формулою:

$$\varepsilon = \sqrt{(\varepsilon_{\text{б}}^2 + \varepsilon_{\text{з}}^2 + \varepsilon_{\text{пр}}^2)}, \quad (4.3)$$

де $\varepsilon_{\text{б}}$ — похибка базування; $\varepsilon_{\text{з}}$ — похибка закріплення; $\varepsilon_{\text{пр}}$ — похибка виготовлення і зношування установочних елементів пристосування.

Оскільки вісь посадкового отвору одночасно є установочною і вимірювальною базою, приймаємо $\varepsilon_{\text{б}} = 0$. Для чисто оброблених опорних поверхонь і ручного фланцевого затиску консервативно приймаємо $\varepsilon_{\text{з}} = 0,015$ мм. Для поворотної оправки приймаємо $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,015$ мм, що відповідає верхній межі допустимого радіального биття оправок в експлуатації, наведений у таблиці 2 методичних вказівок [10]. Тоді:

$$\varepsilon = \sqrt{(0^2 + 0,015^2 + 0,015^2)} = 0,0212 \text{ мм.}$$

Загальну методичну похибку визначаємо за залежністю:

$$\Delta_{\text{мет}} = \varepsilon + \Delta_{\text{р}} + \Delta_{\text{е}} + \Delta_{\text{п}}, \quad (4.4)$$

де $\Delta_{\text{р}}$ — похибка передатного механізму;

$\Delta_{\text{е}}$ — похибка еталона;

$\Delta_{\text{п}}$ — похибка показів індикатора.

Для прямого вимірювання приймаємо $\Delta_{\text{р}} = 0$, $\Delta_{\text{е}} = 0$, а $\Delta_{\text{п}} = 0,01$ мм.

Отже:

$$\Delta_{\text{мет}} = 0,0212 + 0 + 0 + 0,01 = 0,0312 \text{ мм.}$$

Допустима похибка контрольного пристосування за [10] повинна становити орієнтовно 0,2–0,35 допуску контролюваного параметра:

$$\Delta_{\text{доп}} = (0,2 \dots 0,35) \cdot \delta_{\text{дет.}}$$

Для проектного допуску $\delta_{\text{дет}} = 1,6$ мм маємо:

$$\Delta_{\text{доп}} = 0,32 \dots 0,56 \text{ мм.}$$

Розрахункова похибка $\Delta_{\text{мет}} = 0,0312$ мм значно менша за мінімально допустиме значення 0,32 мм, тому прийнята схема забезпечує достатній запас

точності. Для консервативного приймання можна використовувати контрольну межу:

$$\delta_{\text{контр}} = \delta_{\text{дет}} - \Delta_{\text{мет}} = 1,6 - 0,0312 = 1,5688 \text{ мм}$$

Отриманий розрахунок є проектною оцінкою. Дійсну похибку пристосування необхідно визначити під час метрологічної атестації шляхом багаторазових вимірювань еталонної оправки або контрольного диска, перевірки повторюваності показів і контролю власного биття поворотного вузла. ISO 14978:2018 [25] розглядає калібрування і метрологічні характеристики як обов'язкові складові оцінювання GPS-вимірювального обладнання.

Таблиця 4.2 – Розрахунковий баланс похибок контрольного пристосування

Складова похибки	Позначення	Значення, мм	Обґрунтування
Похибка базування	ε_b	0	Установочна і вимірювальна бази суміщені.
Похибка закріплення	ε_z	0,015	Прийнята консервативно для ручного фланцевого затиску.
Похибка оправки та установочних елементів	$\varepsilon_{\text{пр}}$	0,015	Верхня межа для оправки в експлуатації за [10].
Похибка передатного механізму	Δ_p	0	Прямий контакт індикатора з поверхнею.
Похибка еталона	Δ_e	0	Вимірюється різниця показань, еталонний розмір не потрібний.

Продовження таблиці 4.2

Похибка індикатора	Δn	0,010	Прийнято для індикатора з ціною поділки 0,01 мм.
Загальна методична похибка	$\Delta_{мет}$	0,0312	Розраховано за формулами (4.3)–(4.6).

Висновки до розділу

У розділі розроблено контрольне пристосування для перевірки радіального та торцевого биття дискової фрези. Фреза базується по посадковому отвору $\varnothing 90$ мм і торцевій поверхні, закріплюється фланцями та обертається разом з оправкою. Радіальне биття контролюється по вершинах алмазних сегментів, а торцеве — по боковій поверхні корпуса. Обидва параметри визначаються як різниця найбільшого і найменшого показань індикатора за повний оберт.

Розрахункова методична похибка пристосування становить 0,0312 мм, що істотно менше допустимої похибки 0,32–0,56 мм для проєктного допуску 1,6 мм. Отже, конструктивна схема має достатній запас точності. Перед виробничим застосуванням пристосування необхідно відрегулювати, перевірити власне биття оправки та виконати метрологічну атестацію.

5 СИМУЛЯЦІЯ ЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ КОРПУСА ДИСКОВОЇ ФРЕЗИ У СЕРЕДОВИЩІ AUTODESK FUSION

Для перевірки технологічної реалізованості заготівельної операції виконано моделювання процесу ЧПК лазерної різки корпусу дискової фрези Ø800 мм у середовищі Autodesk Fusion, модуль Manufacture. Моделювання дає змогу перевірити коректність вибору обладнання, орієнтації моделі, системи координат, розмірів заготовки, вибору інструмента та формування траєкторії різання зовнішнього контуру й отворів корпусу.

У моделі використано корпус фрези зі сталі 65Г товщиною 4,6 мм. Для оброблення прийнято операцію 2D Profile, яка відповідає наскрізному лазерному різанню листової заготовки. У межах симуляції послідовно виконано вибір верстата, задання параметрів заготовки, налаштування площини оброблення, вибір різального інструмента, призначення контурів різання та візуальну перевірку сформованої траєкторії.

На першому етапі в бібліотеці обладнання обирають верстат ЧПК, який використовують для побудови траєкторії різання у середовищі Fusion.

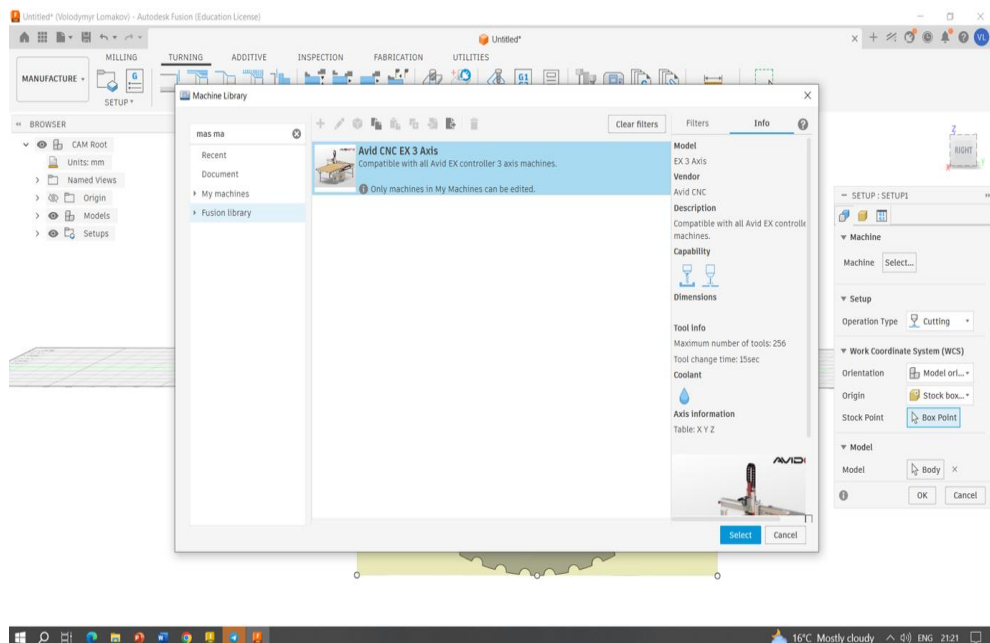


Рисунок 5.1 – Вибір верстата ЧПК для лазерної різки

Далі задають параметри заготовки. Для моделювання прийнято листову заготовку з фіксованими розмірами 810×810 мм, що забезпечує припуск відносно габариту корпуса, при товщині моделі 4,6 мм.

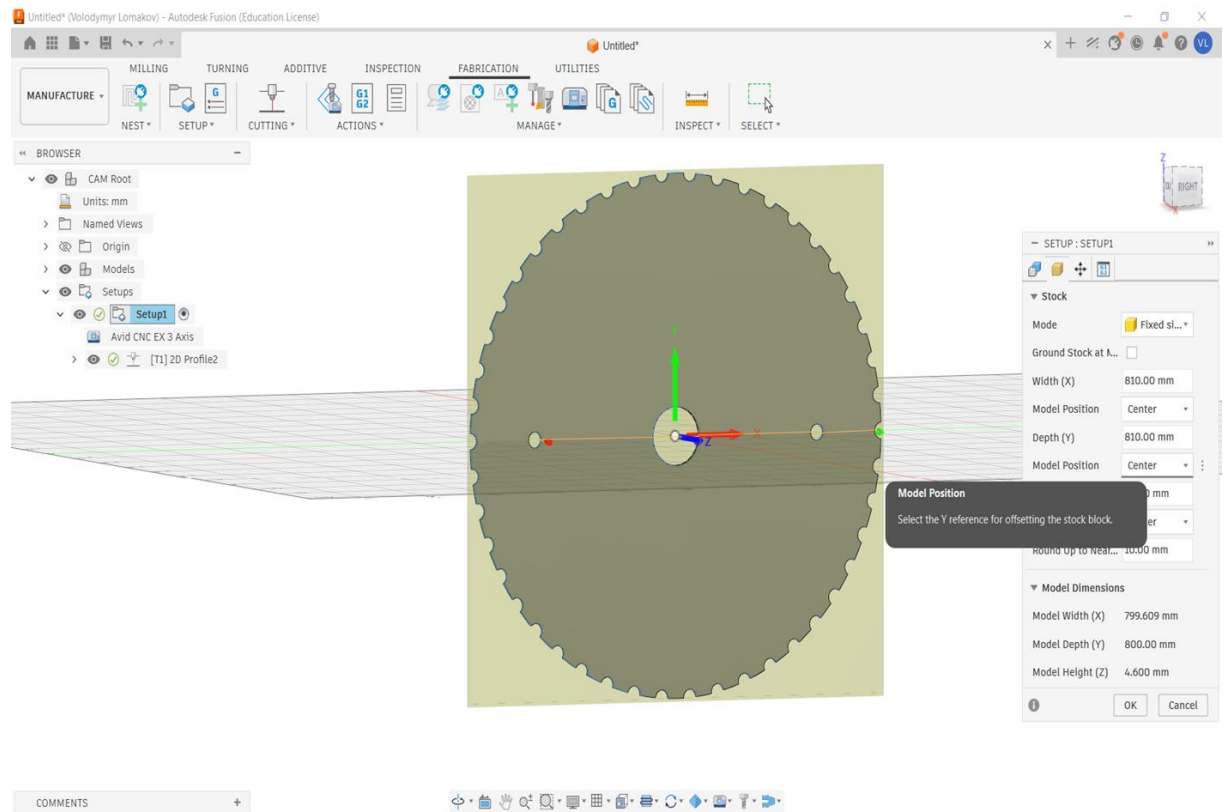


Рисунок 5.2 – Налаштування (cutting): розміри заготовки

Після цього виконують налаштування системи координат і вибір площини оброблення. Для побудови траєкторії задають робочу площину та початок системи координат відносно моделі корпуса.

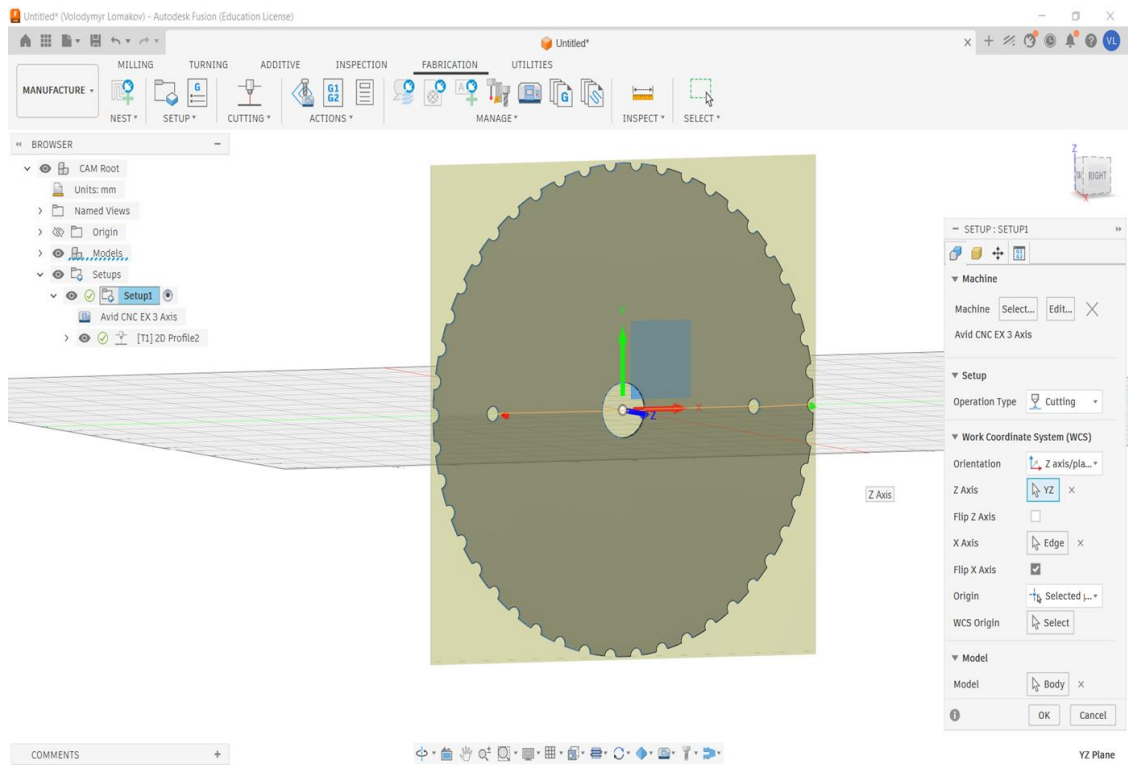


Рисунок 5.3 – Налаштування cutting: вибір площини

Для операції обирають різальний інструмент типу laser cutter із бібліотеки Fusion. У такий спосіб задають технологічні параметри, необхідні для побудови 2D-профілю різання.

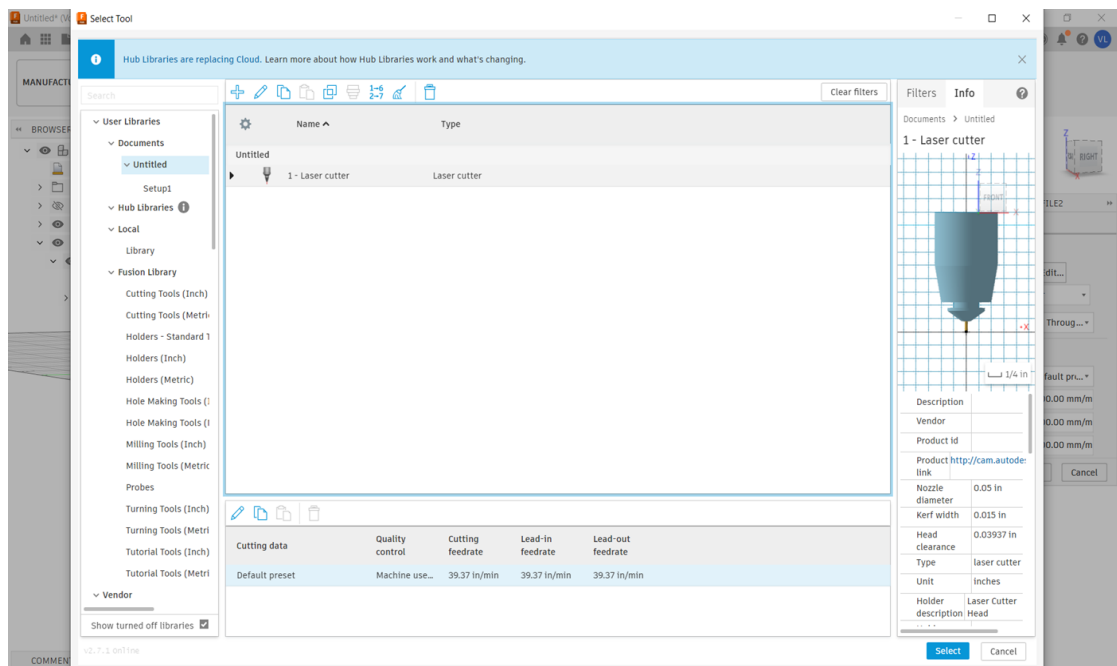


Рисунок 5.4 – Вибір інструмента для різання

На етапі вибору геометрії призначають контури оброблення: зовнішній контур корпуса, посадковий отвір D:90 мм та два допоміжні отвори d:25 мм.

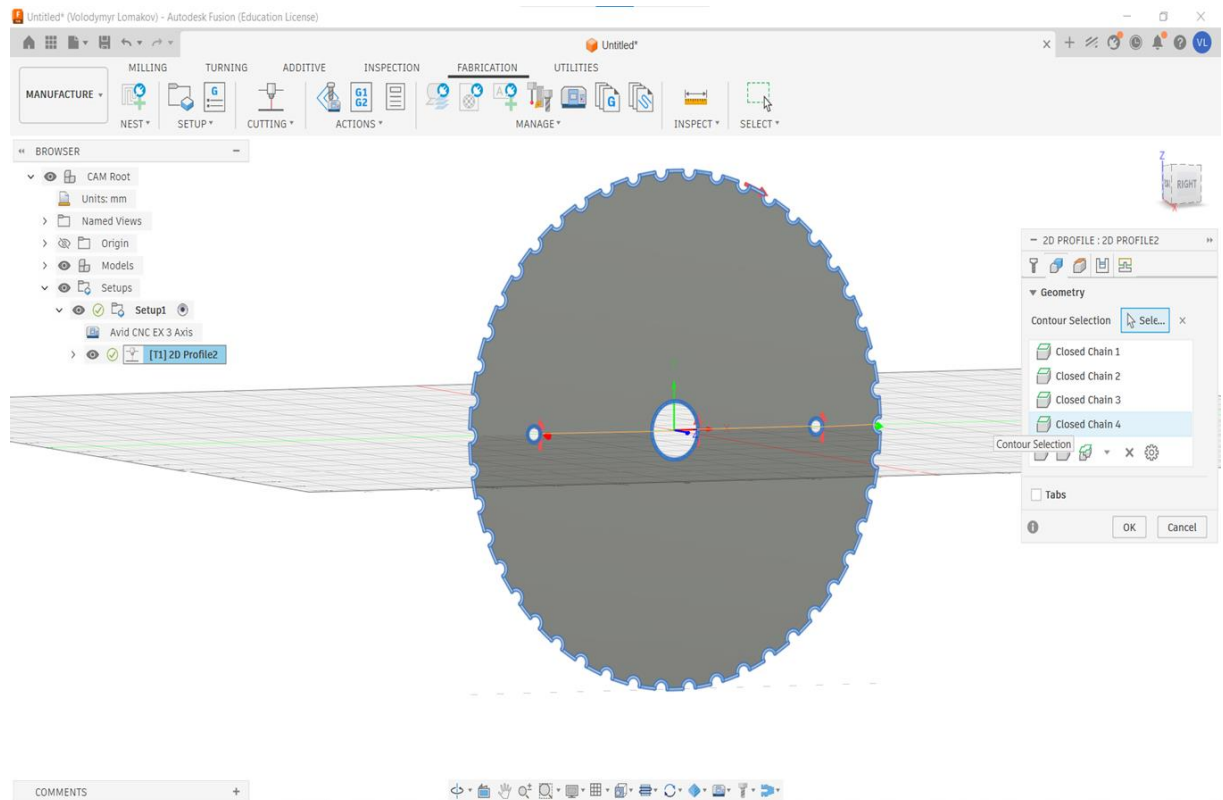


Рисунок 5.5 – Обираємо контур оброблення, посадковий отвір D:90 мм, та 2 допоміжні отвори d:25 мм

Після генерації траєкторії виконують симуляцію, яка дає змогу візуально перевірити правильність проходження контуру, початкових точок, напрямків руху та логіку оброблення.

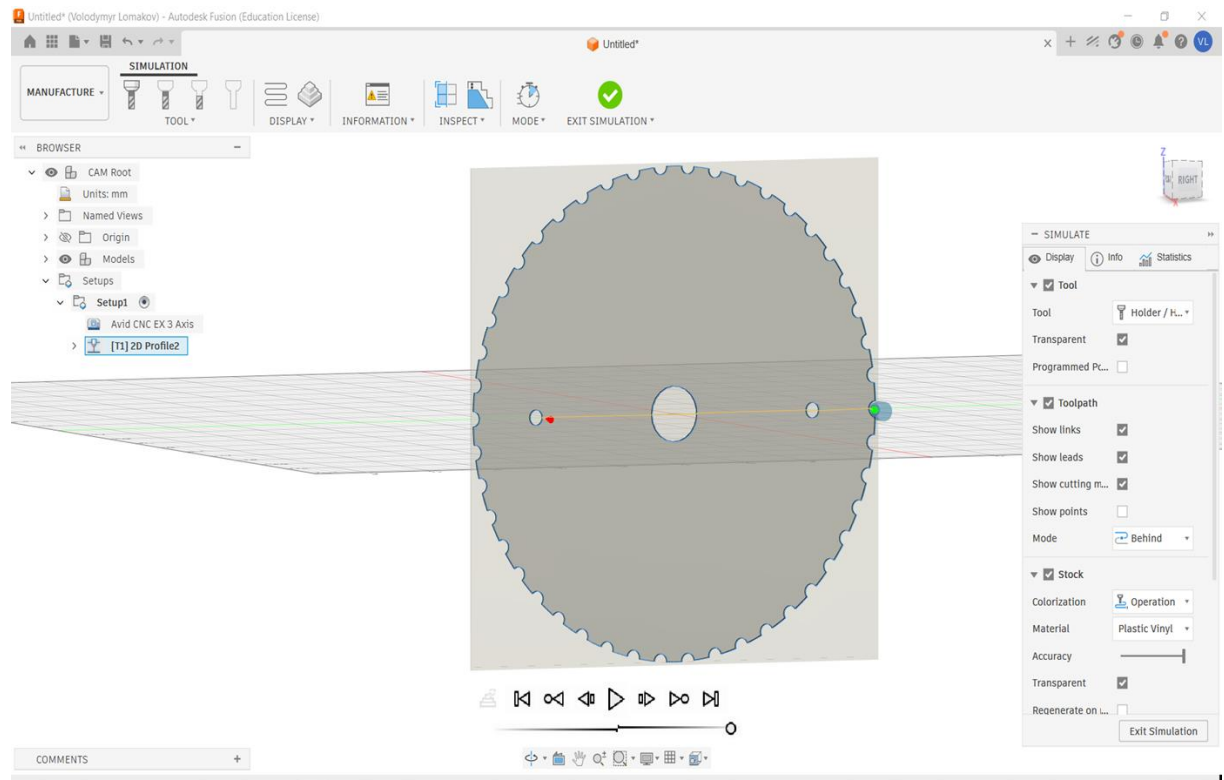


Рисунок 5.6 – Виконано симуляцію

Результат моделювання показав, що операція 2D Profile успішно згенерована у середовищі Autodesk Fusion. У дереві САМ-проекту відсутні попередження та повідомлення про помилки, що підтверджує коректність налаштування верстата, системи координат, параметрів заготовки, вибору інструмента та траєкторії ЧПК лазерної різки корпусу дискової фрези. Отримана симуляція може бути використана як основа для подальшого формування керуючої програми під виготовлення корпусу фрези Ø800 мм.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розроблено конструкцію дискової фрези для оброблення граніту, призначену для роботи на мостовому каменерізному обладнанні з водяним охолодженням. У роботі проаналізовано властивості граніту як оброблюваного матеріалу, розглянуто різальні інструменти для каменеобробки та обґрунтовано доцільність застосування алмазної дискової фрези великого діаметра.

Сформовано конструктивне рішення фрези з корпусом діаметром 800 мм і 46 алмазними сегментами, обґрунтовано геометрію сегмента, схему його розташування та спосіб паяння. Також розроблено базовий технологічний процес виготовлення фрези, визначено режими різання, підготовлено креслення корпусу, алмазного сегмента та складальний кресленик фрези. Для контролю точності виготовлення розроблено контрольне пристосування для перевірки радіального і торцевого биття, а розрахунок показав достатній запас точності його роботи.

Окремо виконано симуляцію лазерної різки корпусу дискової фрези у середовищі Autodesk Fusion. Моделювання підтвердило коректність побудови траєкторії 2D Profile, вибору геометрії оброблення та налаштувань ЧПК. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого виготовлення і впровадження проєктної конструкції у виробничих умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Верба І. І., Даниленко О. В. Обладнання для обробки природного каменю : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 288 с.
2. Dimension Stone Statistics and Information. U.S. Geological Survey. URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/dimension-stone-statistics-and-information> (дата звернення: 01.06.2026).
3. Dimension Stone Design Manual. Natural Stone Institute. URL: <https://pubs.naturalstoneinstitute.org/resources/library/> (дата звернення: 01.06.2026).
4. Diamond Products Training Booklet. Diamond Products. URL: <https://www.diamondproducts.com/media/documents/Training-Booklet.pdf> (дата звернення: 01.06.2026).
5. Diamond Blade Overview. MK Diamond. URL: https://www.mkdiamond.com/pdf/prop65/MK_blade_manual.pdf (дата звернення: 01.06.2026).
6. Yurdakul M. Effect of cutting parameters on consumed power in industrial granite cutting processes performed with the multi-disc block cutter. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 76. P. 104–111. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1365160915000581> (дата звернення: 01.06.2026).
7. Кopač J., Zupančič R. Diamond Tools for Machining of Granite and Their Wear. Journal of Mechanical Engineering. 2009. Vol. 55, No. 12. P. 727–730. URL: https://www.svjme.eu/?id=5997&ns_articles_pdf=/ns_articles/files/ojs3/1630/submission/1630-1-1743-1-2-20171024.pdf (дата звернення: 01.06.2026).
8. Власні виробничі фотоматеріали різання граніту, фрези та алмазних напайок, надані автором дипломного проєкту.

9. Многопил мостовий SQC-2500-4D. Кам'яний Бобер. URL: <https://kam-bober.com.ua/oborudovaniye/stanki-raspilovki-blokov-kamnya/mnogopil-mostovoј-> (дата звернення: 07.06.2026).
10. Дичковський М. Г., Сіправська М. Д. Контрольні пристрої та розрахунок їх точності : методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка». Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2021. 45 с.
11. ДСТУ EN 13236:2019. Вимоги щодо безпечності суперабразивних виробів (EN 13236:2019, IDT). Чинний від 2019-12-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
12. ДСТУ 8429:2015. Прокат із ресорно-пружинної вуглецевої та легованої сталі. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
13. Сталь 65Г: характеристики, властивості, аналоги. Метінвест. URL: <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/65g> (дата звернення: 09.06.2026).
14. Generate a 2D Profile toolpath. Autodesk Fusion Help. URL: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?contextId=MFG-2D-PROFILE> (дата звернення: 09.06.2026).
15. Suzuki E. Fusion 360: A Solution for Water Jet, Laser Cutter, and Plasma Table Projects. Autodesk Fusion 360 Blog. 2022. URL: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/fusion-360-water-jet-laser-cutter-plasma-table/> (дата звернення: 09.06.2026).
16. Multidisc block cutter M585. Pedrini. URL: <https://www.pedrini.it/en/products/m585> (дата звернення: 09.06.2026).
17. Sydorenko A., Mykytenko S. Analysis of Specific Electricity Consumption in Disc Cutting of Granites of Various Hardness. Journal of Donetsk Mining Institute. 2025. No. 1. URL: <https://jdmi.donntu.edu.ua/en/archive/%E2%84%961->

2025/analysis-of-specific-electricity-consumption-in-disc-cutting-of-granites-of-various-hardness/ (дата звернення: 09.06.2026).

18. ISO 17672:2024. Brazing — Filler metals. Geneva : International Organization for Standardization, 2024. URL: <https://www.iso.org/standard/84344.html> (дата звернення: 09.06.2026).

19. ISO 18279:2023. Brazing — Imperfections in brazed joints. Geneva : International Organization for Standardization, 2023. URL: <https://www.iso.org/standard/83027.html> (дата звернення: 09.06.2026).

20. Лазерний верстат по металу з ЧПК MAST ML-3015 ECO: технічні характеристики. ТОВ «Гострий Кут». URL: <https://gostrykut.com/p2714308374-lazernyj-standok-metallu.html> (дата звернення: 13.06.2026).

21. Jainnher Machine Co., Ltd. Grinding Machine Manufacturer. URL: <https://www.jainnher.com/> (дата звернення: 13.06.2026).

22. SSRM2200-W Diamond Blade and Tool Sharpening and Grinding Machine. Plattner GesmbH. URL: <https://www.plattnergesmbh.com/en/produkte/bearbeitung-von-saegblaettern/ssrm-2200W-saegenschaerfmaschine.php> (дата звернення: 13.06.2026).

23. Fully Automatic Brazing Stand for Diamond Segments, model QZD-1400. Ruisheng Stone Machinery. URL: <https://www.ruishengmachinery.com/Fully-Automatic-Brazing-Stand-For-Diamond-Segments-Customizable-size-pd732124388.html> (дата звернення: 13.06.2026).

24. ISO 1101:2017. Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out. Geneva : International Organization for Standardization, 2017. URL: <https://www.iso.org/standard/66777.html> (дата звернення: 14.06.2026).

25. ISO 14978:2018. Geometrical product specifications (GPS) — General concepts and requirements for GPS measuring equipment. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. URL:

<https://www.iso.org/standard/71148.html> (дата звернення: 14.06.2026).

26. Dial Indicators. Series 2. Mitutoyo America Corporation. URL:

https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/F_section.pdf (дата звернення: 14.06.2026).

Різальні інструменти для каменеобробки

Огляд конструкції,
Особливості експлуатації.

За результатами порівняння найбільш доцільним інструментом для різання граніту є дискова алмазна фреза, оскільки вона поєднує достатню жорсткість **корпуса**, високу швидкість різання, стабільну геометрію пропилу та можливість заміни або перепаявання алмазних сегментів.

Проблематика різання граніту

Граніт є твердим, крихким і абразивним матеріалом, тому під час його різання виникають підвищені навантаження на інструмент, інтенсивне зношування робочої частини та значне тепловиділення. Основними вимогами до процесу є забезпечення точного різ, зменшення сколів на краях, ефективне охолодження та стабільна робота інструменту протягом тривалого часу.



Під час різання граніту можуть виникати **скалки** крайок, нерівності поверхні та характерні сліди різання (**запил**). Такі дефекти погіршують якість заготовки, ускладнюють подальшу обробку та підвищують вимоги до жорсткості інструменту, точності режимів різання й ефективності охолодження.

Однією з основних операцій у каменєобробному виробництві є різання граніту на плити, бруски, сходинки, бордюри елементи, заготовки для пам'ятників та інші деталі. Якість цієї операції впливає на точність геометричних розмірів, шорсткість поверхні різі, кількість скопів, тривалість подальшого шліфування і полірування, а також на загальну продуктивність виробництва.

1. ШТАБОВИ (ПОЛОСОВИ) ПИЛИ (ШТРИПСИ).
2. АЛМАЗНО-ШТАБОВИ ПИЛИ (АЛМАЗНИ ШТРИПСИ).
3. ДИСКОВІ ПИЛИ, АЛМАЗНО-ДИСКОВІ ПИЛИ (АЛМАЗНИ ВІДРІЗНІ КРУГИ).
4. КАНАТНІ ПИЛИ, АЛМАЗНО-КАНАТНІ ПИЛИ.
5. АЛМАЗНО-СТРІЧКОВІ ПИЛИ.
6. БАРОВІ ПИЛИ, АЛМАЗНІ БАРОВІ ПИЛИ.
7. ФРЕЗИ.
8. В. ШЛИФУВАЛЬНО-ПОПРУВАЛЬНІ КРУГИ ТА ГОЛОВКИ.



Инструмент	Основне признаци	Перекат	Обимења
Штрицова пила	Разликавање блока на долу	Мажички еднострано отприлику вањаног плит	Трипут широк оборби, потреба за велики блокови
Амизно-штрицова пила	Разликавање тврдих блока	Висока продуктивност поредом у складу са штрицови	Високогласна настур; тешкоће
Дансково пила	Правилније разлика плати блокови	Висока продуктивност разлика, пристојна конструкција блокови	Обимења висоти блокови директно пропорционална
Амизно-контно пила	Разлика великих блока нагоре	Мажички, работи у векторно правцу	Мажичи томеће потврди површи директно разлик
Амизно-штрицова пила	Тешко ако кривајне разлика	Мажички, сваког настава	Мажичи, сваког настава
Борова пила	Висока продуктивност	Висока продуктивност	Спољно зависно настава
Фрези	Разлика паралелно профилирање	Паралелно профилирање	Паралелно профилирање корпусу у тешко настава
Шиферно-позлаћујући	Завршетак оборби површи	Завршетак фасет у директно	Не применом али основно

Умови експлуатації



Позначено: b – товщина; D – діаметр отвору для кріплення диску.

Параметр
Діаметр фрези
Ширина пропилю
Колова швидкість
різання
Частота обертання
фрези
Глибина різання за
прохід
Прийнята глибина
різання
Подача
Прийнята подача
Охолодження

Режим різання

Позначення	Значення	Амалзонасний шар сегмента містить 50% синтетичних алмазних зерен, заповнених у металевій зв'язці.
D	8,0 мм	Алмази зерна виконують основну різальну функцію, а зв'язка утримує їх і забезпечує поступове відкриття нових зерен під час зношування сегмента. Це підвищує зносостійкість інструменту та стабільність різання граніту.
B	5,4-5 мм	
V	29-30 м/с	
n	≈700 об/хв	
f	8-12 мм	
f	10 мм	
S	0,4-0,8 мм/хв	
S	0,5 мм/хв	
—	вода в зону різання	

Розроблена дискова алмазна фреза Ø800 мм призначена для роботи на мостових каменеобробних верстатах при різанні заготовок із граніту. Експлуатація інструменту здійснюється в умовах значних механічних навантажень, підвищеної абразивної дії матеріалу та обов'язкового охолодження зони різання водою.



Мостовий верстат для різання граніту



Після розкрою отримують граніті заготовки прямокутної форми із заданими розмірами та припуском на подальшу обробку. Після шліфування, калібрування та остаточного формування з них виготовляють готові деталі: плити, сходинки, підвіконня та облицювальні елементи.

