МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Інститут механічної інженерії та транспорту
Кафедра проектування машин та автомобільного інжинірингу

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до бакалаврської кваліфікаційної роботи

спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»

Розроблення конструкції універсального пристосування для фрезерування на верстатах з ЧПК

Виконав студент групи МБ-31сп: _____ Олег ПЕЛЕШОК

Керівник: _____ к.т.н., доц. Роман ГОРОДНЯК

Консультанти: _____ к.е.н., доц. Леся СТРУТИНСЬКА

_____ к.т.н., доц. Ростислав ЯЦЮК

Завідувач кафедрою: _____ д.т.н., проф. Василь ДМИТРІВ

Львів – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Інститут механічної інженерії та транспорту Кафедра ПМАІ

спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Зав. кафедрою
д.т.н., проф. Василь ДМИТРІВ
_____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на бакалаврську кваліфікаційну роботу

студенту групи МБ-31сп: Олегу ПЕЛЕШКУ

1. Тема: “Розроблення конструкції універсального пристосування для фрезерування на верстатах з ЧПК”

Затверджена наказом по університету № 1399-4-08 від 17.04. 2025р.

2. Термін здачі студентом закінчені роботи 10.06.25 р.

3. Вхідні дані: *матеріали літературного огляду, спеціальна і довідкова література, каталоги технологічного обладнання і машин*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

4.1	Титульний аркуш. Завдання. Розширена анотація. Зміст. Вступ
4.2	Технологічна частина
4.3	Конструкторська частина
4.4	Додатки (економічна частина, охорона праці)
4.5	Перелік використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Консультанти проекту із зазначенням розділів:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Економічна частина	к.е.н., доц. Леся СТРУТИНСЬКА		
Охорона праці	к.т.н., доц. Ростислав ЯЦЮК		

7. Дата видачі завдання “ _____” _____ 2025 р.

Керівник к.т.н., доц. Роман ГОРОДНЯК _____

Завдання прийняв
до виконання Олег ПЕЛЕШОК _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання	Примітка
1	Технологічна частина	30.04.25	
2	Конструкторська частина	20.05.25	
3	Графічна частина	25.05.25	
4	Економічна частина	1.06.25	
5	Охорона праці	2.06.25	
6	Оформлення роботи	9.06.25	

Студент Олег ПЕЛЕШОК _____

Керівник к.т.н., доц. Роман ГОРОДНЯК _____

АНОТАЦІЯ

Олег ПЕЛЕШОК, к.т.н. Роман ГОРОДНЯК (керівник). Розроблення конструкції універсального пристосування для фрезерування на верстатаз з ЧПК // Бакалаврська кваліфікаційна робота. – НУ «Львівська політехніка», кафедра «Проектування машин та автомобільного інжинірингу». – Львів, 2025.

Робота містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка складається зі вступу, технологічної, конструкторської частин, додатків з: економічною частиною, охороною праці.

Важливим завданням масового виробництва є підвищення продуктивності та точності виготовлених деталей. Саме тому важливо спростити та впорядкувати виробництво. Одним із шляхів цього є зменшення кількості затискних операцій. У масовому виробництві верстати з ручним керуванням замінюються верстатами з ЧПК, що здатні до швидкого та точного виробництва. Важливо мінімізувати непродуктивний час виробничого циклу, тобто зміну заготовок та інструментів. Для цього використовуються спеціальні пристосування. Це значно полегшує виробництво, особливо деталей складної форми. Інші переваги включають підвищення точності заготовки та зменшення вимог до затискання, що зменшує необхідну кваліфікацію оператора. Використання таких пристосувань суттєво скорочує час необхідний для виробництва. У масовому виробництві вигідно створювати спеціалізоване пристосування, оскільки витрати розподіляються між великою кількістю деталей.

Метою даної бакалаврської роботи було проектування затискного пристрою для фрезерування заготовки шестерні автомобільного склоочисника на чотиривісному верстаті з ЧПК, враховуючи мінімальні витрати та простої під час виробництва. Проміжними цілями були проведення пошуку комерційно доступних продуктів, аналіз проблеми, розробка концептуального рішення та

перетворення обраної концепції дизайну на креслярську документацію. Всі основні та цілі було досягнуті.

У дослідженні коротко охарактеризовано затискні пристрої та вимоги до їх конструкції. Потім були представлені можливості позиціонування заготовки та проведено пошук доступних пристосувань. Згодом було показано кілька придатних для виробництва верстатів з ЧПК.

В роботі розраховано силу необхідну для надійного затискання, що становить 714 Н. Проведено перевірочні розрахунки тиску на контакту поверхню між затискачем та заготовкою. Результати розрахунків показали, що тиск незначний, а деформація заготовки, яка може спричинити зміну положення різьбових отворів, становить лише 0,1 мм і менша за значення допуску на кресленні деталі.

Подальші вдосконалення можуть включати роботизовану руку, яка використовуватиме спеціальні тримачі для затискання та видалення кількох деталей одночасно. Це дозволило б досягти ще більшої продуктивності.

Також розраховано економічний ефект від впровадження універсального пристосування для фрезерування на верстатаз з ЧПК у виробництво, розроблено заходи з охорони праці.

В графічній частині проекту приведені: конструкція універсального пристосування для фрезерування, деталювання його елементів.

Ключові слова: фрезерне пристосування, CAD, Autodesk Inventor, оптимізація, метод скінчених елементів, ЧПК.

ANNOTATION

Oleh PELESHOK, Ph.D. Roman HORODNIAK (promotor). Development of a design of a universal device for milling on CNC machines – Lviv Polytechnic National University, Department of Equipment Design and Operation – Lviv, 2025.

The work contains an explanatory note and a graphic part. The explanatory note consists of an introduction, technological, design parts, appendices with: economic part, labor protection and specifications for the graphic part.

An important objective in mass production is to improve productivity and the precision of manufactured parts. Therefore, it is essential to simplify and streamline the production process. One way to achieve this is by reducing the number of clamping operations. In mass production, manually operated machines are being replaced by CNC machines capable of fast and precise manufacturing. Minimizing non-productive time in the production cycle—such as changing blanks and tools—is crucial. For this purpose, special fixtures are used. This significantly facilitates production, especially for parts with complex geometries.

Additional benefits include increased part accuracy and reduced clamping requirements, which in turn lower the operator’s required qualification level. The use of such fixtures significantly shortens the time needed for manufacturing. In mass production, the development of specialized fixtures is cost-effective, as the expenses are distributed over a large number of parts.

The aim of this bachelor's thesis was to design a clamping device for milling a wiper gear blank on a four-axis CNC machine, considering minimal production time and costs.

The intermediate objectives included researching commercially available products, analyzing the problem, developing a conceptual solution, and converting the selected design concept into technical drawings. All major objectives were achieved.

The study briefly describes clamping devices and the requirements for their design. It then presents possible workpiece positioning methods and includes a review of available clamping fixtures. Additionally, several suitable CNC machines for production were presented.

The required clamping force was calculated to be 714 N. Verification calculations were performed to determine the pressure on the contact surface between the clamp and the workpiece. The results showed that the pressure was negligible, and the deformation of the blank—which could potentially affect the location of threaded holes—was only 0.1 mm, which is within the allowable tolerance specified in the part drawing.

Future improvements may include the use of a robotic arm equipped with special holders for clamping and removing multiple parts simultaneously. This would allow for even greater productivity.

An economic analysis of implementing the universal CNC milling fixture into production was also performed, along with the development of occupational safety measures.

The graphical part of the project includes the design of the universal milling fixture and detailed drawings of its components.

Keywords: milling fixture, CAD, Autodesk Inventor, optimization, finite element method, CNC.

ЗМІСТ

стор.
ВСТУП…… 9
1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА…...……..…….……... 10
1.1 Аналіз пристосувань для верстатів…….....……..… 10
1.1.1 Особливості процесу проектування.....…….....……..… 11
1.1.2 Особливості використання пристосувань...…….....……..… 12
1.2 Огляд наявних на ринку пристосувань…….. 16
1.3 Огляд фрезерних верстатів із ЧПК……..…….. 20
1.4 Висновки до розділу…… 24
2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА……..…….…… 26
2.1 Обґрунтування прототипу фрезерного пристосування……...…. 26
2.1.1 Перша концептуальна модель пристосування…….. 26
2.1.2 Друга концептуальна модель пристосування……... 27
2.1.3 Третя концептуальна модель пристосування…….…….. 28
2.1.4 Четверта концептуальна модель пристосування…….. 29
2.2 Конструктивне рішення фрезерного пристосування…….……... 32
2.3 Розрахунок сил різання та затиснення…….. 34
2.4 Центральна секція……..…….…… 38
2.5 Висновки до розділу…… 40
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……... 41
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ…….…… 42
ДОДАТКИ…….…… 45
Додаток А. Економічна частина……..…….…… 45
Додаток В. Охорона праці…….…… 57

ВСТУП

Важливим завданням масового виробництва є підвищення продуктивності та точності виготовлених деталей. Саме тому важливо спростити та впорядкувати виробництво. Одним із шляхів цього є зменшення кількості затискних операцій. У масовому виробництві верстати з ручним керуванням замінюються верстатами з ЧПК, що здатні до швидкого та точного виробництва. Важливо мінімізувати непродуктивний час виробничого циклу, тобто зміну заготовок та інструментів. Для цього використовуються спеціальні пристосування. Це значно полегшує виробництво, особливо деталей складної форми. Інші переваги включають підвищення точності заготовки та зменшення вимог до затискання, що зменшує необхідну кваліфікацію оператора. Використання таких пристосувань суттєво скорочує час необхідний для виробництва. У масовому виробництві вигідно створювати спеціалізоване пристосування, оскільки витрати розподіляються між великою кількістю деталей.

Тема дипломної роботи - проектування універсального фрезерного пристосування для заданої деталі, що виготовляється серійно, методом фрезерування на чотиривісному обробному центрі з ЧПК. В роботі розглянуто комплекс підготовчих операцій. Подано принципи конструювання та методи позиціонування заготовок у пристосуванні. Здійснено огляд наявних на ринку пристосувань. Запропоновано декілька варіантів конструкції пристосування, порівняно їх, та обрано оптимальну концепцію із подальшою її детальною розробкою у вигляді креслярської документації.

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз пристосувань для верстатів

Усі види виробництва, як поштучне так і масове, потребують пристосувань. Заготовка повинна бути затиснута таким чином, щоб завжди зберігати правильне положення відносно інструмента. Це положення не має зазнавати змін внаслідок прикладання сил. Отже, пристосування можна визначити як допоміжний пристрій, призначений для унікального позиціонування та утримання компонентів під час обробки та для утримання компонентів разом під час складання та для направлення інструменту [1].

Пристосування класифікуються за призначенням [1]:

− універсальні: використовуються для затискання заготовок одного типу, але різних розмірів і форм (патрони чи лещата).

Вони складаються з постійних компонентів (корпус пристосування, силовий блок) та змінних або регульованих компонентів (напрямні та затискні елементи).

Модульні пристосування збираються зі стандартизованих деталей у пристосування для заданої заготовки.

− спеціальні пристосування: для затискання окремої заготовки.

Це одноцільовий пристрій, в якому заготовку можна затискати зручніше та краще, ніж в універсальному пристосуванні.

Економічність є ключовим фактором у розробці цих виробів. Конструктор повинен забезпечити ефективність отриманого продукту не лише з точки зору функціональності, але й з точки зору витрат на виробництво та обслуговування. Продукт вважається економічно ефективним, якщо витрати на його придбання та обслуговування нижчі за економію, яка отримується від його впровадження.

Ціна продукту також включає витрати, пов'язані з його виробництвом та обслуговуванням. Окупність інвестицій у спеціальні препарати не повинна перевищувати термін виробництва продукту, для якого вони призначені, тобто від 2 до 3 років [2].

1.1.1 Особливості процесу проектування

Перед проектуванням пристосування, необхідно уточнити весь процес виготовлення компонентів. Важливо, щоб під час обробки першої операції була отримана поверхня для позиціонування в наступній операції. Під час проектування необхідно враховувати використання пристосування для декількох операцій [2].

Пристосування має бути жорстким, щоб не деформуватись під дією сил затискання та різання. Оброблювана поверхня повинна розташовуватися максимально близько до затискної поверхні верстата. Це гарантує стійкість пристосування. Положення заготовок у пристосуванні повинно бути закріплене нерухомими упорами, а рівнодіюча робочих сил - діяти на упорні поверхні [1].

Водночас, конструкція не повинна допускати нічого, окрім правильного введення заготовки. Експлуатація має бути максимально простою, швидкою та не вимагати великих зусиль. Між елементами керування та затискання використовуються шестерні.

Якщо необхідно переміщувати пристосування в процесі роботи - його вага не має перевищувати 20 кг. Елементи керування повинні бути легкодоступними, а напрямок руху затискних елементів має бути рівномірним по всьому пристосуванню [1].

Стружка може спричинити зміну положення заготовки у пристосуванні, пошкодження затискних елементів чи навіть травмування оператора, тому важливим є її максимальне зміщення та наявність захисту. Видалення стружки забезпечується її падінням під власною вагою, з фасками, по яких стружка може ковзати. Накопичення стружки усувається, видаливши заглиблення та важкодоступні внутрішні краї та кути. Деталі, що піддаються впливу стружки,

загартовані для зменшення зносу. Захист рухомих частин досягається шляхом їх заглиблення або покриття [1].

Поверхні навантаження та затискання не повинні бути більшими, ніж необхідно для затискання у пристосуванні, як через можливе осідання стружки, так і для економії матеріалу. Стружку з виробу видаляють промиванням рідиною або продуванням стисненим повітрям. Поверхні, що піддаються зносу (затискні елементи) повинні бути твердими та замінними [1].

Для забезпечення безпеки оператора всі гострі краї повинні бути заокруглені, а зона вставки компонентів має бути розташована достатньо далеко від небезпечних частин машини [2].

Вибір правильного матеріалу для певного пристосування має вирішальне значення, оскільки він повинен відповідати широкому спектру вимог, таких як достатня міцність, жорсткість, точність та зносостійкість [1].

Вибір матеріалу залежить від навантаження, зносу, форми та функції виробу. Необхідно враховувати ціну та доступність матеріалу. Вага повинна бути мінімальною з точки зору транспортування, а матеріал повинен витримувати умови середовища, в якому пристрій працюватиме [1].

1.1.2 Особливості використання пристосувань

Точність виготовлення залежить від ідеального позиціонування заготовки та правильного вибору поверхонь. Поверхні на деталі, з яких віднімаються розміри та на яких розміщується деталь, називаються базовими поверхнями. Вони використовуються для визначення положення заготовки [2].

Ці поверхні поділяються на вимірювальні бази, тобто поверхні, уявні точки або прямі лінії, від яких конструктор визначає відстань оброблюваної поверхні. Поверхня, на якій розміщено компонент, називається базовою поверхнею навантаження. Крім того, на заготовці є опорні поверхні, які безпосередньо контактують з поверхнями позиціонування пристосування [2].

Затискні поверхні використовуються для безпосереднього затискання. Оброблені поверхні – це ті, що обробляються після затискання. На практиці

дуже часто трапляється поєднання вищезазначених напрямків [1].

Нерухомі опорні елементи служать для підтримки поверхні заготовки, тим самим вказуючи її положення. Необхідними властивостями є постійна точність положення та максимально можлива зносостійкість. З цієї причини робочі поверхні цементують та гартують [1].

Опорні поверхні повинні бути чистими та якомога меншими, щоб заготовка могла ідеально на них лежати. Стабільність заготовки досягається шляхом встановлення максимально можливої відстані між опорними поверхнями, враховуючи розміри та жорсткість заготовки. Результуюча сила різання інструменту повинна вловлюватися нерухомими опорами, щоб не порушувати стійкість затиснутої заготовки, а це означає, що результуюча сила, що діє на заготовку, повинна діяти на поверхню, обмежену точками опори [1].

Нерухомі опорні елементи за формою поділяються на такі категорії:

1. Призматичні опори (рис. 1.1).

Вони призначені для позиціонування циліндричних заготовок, визначають положення заготовки як вертикально, так і поперечно, тому їх положення необхідно фіксувати двома штифтами. Кут відкриття зазвичай становить від 60 до 120°. Призматичні опори кріпляться до корпусу приладу гвинтами [1].

Менші призми виготовляються з одного шматка, великі призми розділені через високі напруження та деформації після термічної обробки. Призми гартуються, а потім відпускаються до твердості HRC 50-55 та обробляються тонким шліфуванням або притиранням [3].

Рис. 1.1 – Призматична опора [4]

2. Опорні рейки (рис. 1.2).

Використовують для підтримки важких заготовок, опорна поверхня яких повинна бути точно оброблена таким чином, щоб вона спиралася на рейку всією поверхнею. Для кращої посадки заготовки рейки роблять вузькими та короткими. Пристосування кріпиться до корпусу за допомогою 2 або більше гвинтів, які мають заглиблення, щоб не впливати на посадку заготовки [1].

Рис. 1.2 – Опорна рейка [5]

3. Центрувальні штифти (рис. 1.3).

Центрувальні штифти використовуються для позиціонування заготовок з точним циліндричним отвором. Їх запресовують у корпус пристосування з невеликим тиском або вставляють і затягують гайкою, якщо передбачається їх знос і часта заміна. Щоб було легше вставляти заготовку, штифт обробляють фаскою або заокругленням. Заготовка спирається безпосередньо на оброблений корпус пристосування або на буртик, що є частиною штифта [1]. Сплющені центрувальні штифти (рис. 1.3, б) допускають невеликий рух у напрямку, перпендикулярному до циліндричної деталі.

а) б)

Рис. 1.3 – Циліндричний (а) та сплющений (б) центруючі штифти [6]

4. Фіксовані опори (рис. 1.4).

Використовуються як опори для заготовок, упори чи ніжки. Виготовлені з інструментальної сталі та загартовані для підвищення міцності [1].

Опори виготовляються з циліндричною головкою (рис. 1.4, а) або з шестигранною головкою та різьбою (рис. 1.4, б), якщо можливий сильний знос опорних поверхонь.

Рис. 1.4 – Опори із циліндричною (а) та шестигранною (б) головками [6]

5. Затискні вежі (рис. 1.5).

Використовуються на чотиривісних горизонтально-фрезерних верстатах. Затискна вежа збільшує кількість затискних поверхонь верстата, тим самим досягаючи високого коефіцієнта використання машини та мінімізуючи час простою [7].

Розміщення затискної вежі або піраміди в машині здійснюється за допомогою відповідної системи переміщення, можливо, крана або робота. Затискні вежі виготовлені з цільного шматка чавуну з графітом. Стабільна конструкція порожнистого корпусу гарантує високу жорсткість, хороше гасіння вібрацій та високу базову точність [7].

Для позиціонування на піддонах верстатів згідно з DIN 55 201 використовується центруючий штифт, який розміщується в отворі по центру базової поверхні та піддону [8]. Вежі виготовляються кількох форм:

чотиригранної, шестигранної та восьмигранної. Їх також можна розділити за типом затискних поверхонь: з Т-подібними пазами, з різьбовими сітчастими отворами або з припуском на обробку, який можна налаштувати під конкретний виріб [8].

Рис. 1.5 – Чотиригранний затискний куб з припуском на обробку [8]

1.2 Огляд наявних на ринку пристосувань

Розпочнемо огляд із подвійної затискаючої системи HILMA DS 100 (рис. 1.6) - гідравлічних машинних лещат з нерухомою щелепою посередині та двома рухомими щелепами збоку. Середні та бічні щелепи є змінними. У лещатах можна затискати одну або дві заготовки. Щелепи можуть створювати зусилля 25 кН, а найбільший розмір, який можна затиснути, становить 334 мм, хід затискання кожної щелепи - 44 мм. Їхня ширина становить 100 мм. З боків лещат є різьбові отвори для кріплення упорів заготовок [9].

Рис. 1.6 – HILMA DS 100 [9]

Лещата можна прикріпити до робочої поверхні за допомогою затискачів або за допомогою різьбових отворів у лещатах. Ходовий гвинт інкапсульований від потрапляння стружки та приводиться в рух гідравлічним циліндром на кінці лещат [9].

TANDEM KSH3-F 200 (рис. 1.7) - гідравлічний блок затискання. Одна щелепа нерухома, тоді як інша щелепа рухома. При максимальному тиску гідравлічної оливи 60 бар він може розвинути затискну силу 60 кН. Гідравлічний поршень розташований вертикально, а рух щелеп забезпечується клиновим механізмом, що призводить до невеликого максимального відкриття, лише 4 мм [10].

Конструкція кулаків запобігає осіданню стружки, а отвори для гвинтів кріплення патрона оснащені ковпачками. Крім того, для видалення стружки з щелеп є порожнини для здування стружки стисненим повітрям. Лещата оснащені системою змащення, яка змащує всі поверхні тертя. Подача мастила може здійснюватися вручну за допомогою мастильного шприца або автоматично через з'єднувальні роз'єми на нижній частині пристосування. Затискач може бути додатково оснащений індуктивним датчиком положення [10].

Рис. 1.7 – TANDEM KSH3-F 200 [10]

ROEMHELD SCT 80 (рис. 1.8) –система затискання револьверної головки, яка використовується на вертикальних чотиривісних обробних центрах чи п'ятивісних центрах. Затискач має компактні розміри. Загальна висота вежі становить 300 мм. У спеціальних затискачах шириною 80 мм можна затиснути загалом 4 заготовки. Максимальне зусилля, що застосовується, становить 25 кН при затягуванні динамометричним ключем з моментом 60 Нм. Найбільша довжина розкритих щелеп становить 165 мм [11].

Рис. 1.8 – Затискна вежа SCT 80 [11]

Затискна система Kurt WedgeLock Tower SSRB1124 (рис. 1.9) використовує затискні рейки з Т-подібними пазами, які містять клинові затискачі, що можуть переміщатися в пазах.

Рис. 1.9 – Затискна вежа Kurt SSRB1124 [12]

Затискні рейки дозволяють регулювати затискачі відповідно до різних заготовок. Клинові затискачі працюють шляхом затягування гвинта, який розширює клиновий механізм, що одночасно затискає дві заготовки. Висота затискної вежі становить 600 мм, максимальне зусилля клинових затискачів – 13,3 кН. Ширина затискача становить 50 мм [12].

Магнітні затискачі. Електроперманентний магнітний патрон Mastermill (рис. 1.10, а) є компактною низькопрофільною конструкцією та номінальним зусиллям затиску 170 Н/см2 [13].

По всьому колу електромагніту є заглиблення для затискачів. Заготовки розміром більше 50 х 110 мм та товщиною більше 12 мм можна затискати. Затискач оснащений швидкоз'ємним роз'ємом, який дозволяє підключати кілька затискачів до одного блоку керування [13].

а) б)

Рис. 1.10 – Магнітні патрони Mastermill (а) та BJP (б) [13, 14]

Електромагнітний затискач BJP (рис. 1.10, б) оснащений котушками в патроні для максимального використання їхньої ємності [14].

Магнітну силу можна регулювати для створення ідеальних умов за допомогою блоку керування, що дозволяє підключитися до системи керування машиною. Заготовки можна розмагнітити після обробки, щоб переконатися, що в них немає залишкового магнетизму [14].

Патрон використовується для шліфування та фрезерування [14].

1.3 Огляд фрезерних верстатів із ЧПК

Щоб бути продуктивним, верстат повинен мати потужний шпиндельний привід з максимально можливою швидкістю різання. Крім того, він повинен мати максимально можливі швидкості подачі. Також потрібна точність, щоб уникнути виготовлення дефектних заготовок. Точність залежить від точності позиціонування, а також від компенсації теплового розширення. Жорсткість верстата важлива для запобігання вібрації та погіршення якості поверхні. Машина також повинна мати власне джерело пневматичного або гідравлічного тиску для керування пристосуванням, що усуває необхідність використання зовнішнього джерела. Розглянемо представлені на світовому ринку моделі оброблювальних центрів.

ROBODRILL α-D28LiB5ADV Plus Y500 (рис. 1.11). Фрезерний центр фірми FANUC має вертикально встановлений шпиндель, четверта вісь реалізована столом, що обертається горизонтально вздовж власної осі. Завдяки подовженому ході осі Y (500 мм) та розміру столу 850 х 500 мм, його можна використовувати з великими заготовками [15].

а)

б)

Рис. 1.11 – ROBODRILL α-D28LiB5ADV Plus Y500 (а) та похилий стіл (б) [15]

Інструменти затискаються в шпинделі з конусом ISO 30. Максимальна робоча швидкість подачі становить 30 м/хв, а швидкість швидкої подачі — 54 м/хв. Шпиндель приводиться в рух електродвигуном потужністю 11 кВт. Максимальна швидкість шпинделя становить 24 000 об/хв [15].

Завдяки можливості використовувати 28 інструментів та швидкій зміні інструментів, що займає лише 1,4 секунди, цей пристрій є дуже ефективним. Досягнута точність становить менше 0,1 мкм, а машина може бути оснащена компенсацією теплового розширення за допомогою штучного інтелекту [15].

DMG MORI NHX 5000 (рис. 1.12) горизонтальний чотиривісний фрезерний центр з поворотним столом, який безпосередньо з'єднаний з безредукторним приводом. Перевагою відсутності шестерень для обертання столу є висока швидкість обертання 100 м/с та більш точне позиціонування. Час повороту столу на 90° становить 1,65 с [16].

Висока точність забезпечується охолодженням шпинделя та вимірюванням положення по всіх осях з точністю 0,01 мкм. Верстат виготовляється зі шпинделями BT40 або HSK-A63. Максимальна швидкість шпинделя становить 30 000 хв-1. Інструментальний магазин вміщує 60 інструментів, опціонально до 240, а система зміни інструментів змінює інструмент за 2,2 с. Потужність становить 37 кВт, а машина може розвивати крутний момент 250 Нм [16].

Рис. 1.12 – Фрезерний центр DMG MORI NHX 5000 [16]

Haas EC-500 (рис. 1.13) - вертикальний чотиривісний центр Haas розроблений для масового виробництва без необхідності моніторингу верстата. Розмір ходу машини становить 813 х 635 х 711 мм. У верстаті використовується ступінчаста основа, тобто лінійна напрямна осі X лежить у двох площинах, що разом із гідравлічним затисканням підвищує жорсткість і точність верстата. Рух по четвертій осі забезпечується поворотним столом з високою точністю позиціонування. Верстат дозволяє одночасний рух шпинделя та поворотного столу [17].

Верстат оснащений шпинделем з конусом ISO 40. Максимальна потужність шпиндельного приводу становить 22,4 кВт. Найвища швидкість 8100 хв$^{-1}$. Максимальна швидкість подачі становить 21,2 м/хв. Скорочення непродуктивного часу досягається завдяки швидкості прискореного переміщення 35,6 м/хв. Шпиндель оснащений контуром з чотирма форсунками для охолодження, що дозволяє ефективно охолоджувати як короткі, так і довгі інструменти. Верстат оснащений автоматичним змінником інструменту місткістю 30 + 1 штук, який може змінити інструмент за 2,8 с [17].

Рис. 1.13 – Фрезерний центр Haas EC-500 [17]

Okuma MA-400HA (рис. 1.14) - чотиривісний горизонтальний обробний центр з поворотною зміною палет, що забезпечує високу точність, надійність та продуктивність.

Верстат характеризується великим робочим простором, швидкими подачами до 60 м/хв та низькими експлуатаційними витратами. Дозволяє обробляти заготовки діаметром до 600 мм та висотою 710 мм з максимальною вагою 400 кг. Додатковий час зменшується завдяки швидкій зміні інструменту за 1,3 с. Стандартний магазин на 30 інструментів можна опціонально розширити до 198 інструментів [18].

Рис. 1.14 – Фрезерний центр Okuma MA-400HA [18]

Проаналізовані оброблювальні центри є чотиривісними, але в кожному четверта вісь реалізована по-різному. На виробництві деталь виготовляється великими серіями, тому найважливішим параметром верстата є його продуктивність.

Важливими є максимально можливі швидкості обробки та подачі, а також швидкість зміни інструменту. Механічне затискання не підходить для масового виробництва, тому необхідно, щоб верстат був оснащений власним джерелом стисненого повітря або олії під тиском.

Параметри усіх проаналізованих оброблювальних центрів зведено до табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики оброблювальних центрів

Назва	Спосіб реалізації 4-ї осі	Максимальна швидкість, $хв^{-1}$	Подача, м/хв	Час зміни інстр., с.	Гідравлічне/ пневматичне джерело
ROBODRILL α-D28LiB5ADV Plus Y500	нахилений стіл	24000	30/54	1,4	-
NHX 5000	Розсувний поворотний стіл	30000	60	2,2	так/так
EC-500	Розсувний поворотний стіл	8100	21,2/35,6	2,8	так/ні
MA-400HA	Розсувний поворотний стіл	20000	60	1,3	-

1.4 Висновок до розділу

Метою є проектування системи затискання компонентів на чотиривісному обробному центрі з ЧПК з врахуванням мінімальних витрат та простоїв верстата під час масового виробництва.

Дослідження показує, що найбільшу кількість заготовок одночасно можна затиснути в горизонтальному фрезерному центрі, оснащеному затискною головкою. Отже, верстат DMG MORI NHX 5000 видається найкращим варіантом, оскільки він має найвищі можливі швидкості та швидкості подачі серед описаних верстатів. Машина також має джерело гідравлічного тиску. Він

призначений для автоматизованого затискання, оскільки має власне джерело гідравлічного тиску, а гідравлічне середовище подається в робочий простір зверху верстата.

Комерційні револьверні головки із затискачами не дозволяють затискати велику кількість складних заготовок одночасно, тому буде використовуватися затискна револьверна головка, на якій будуть монтуватися затискні пристосування.

2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування прототипу фрезерного пристосування

Розглянемо чотири концепції фрезерних пристосувань, які відрізняються способом застосування затискної сили. У всіх варіантах використано за прототип затискну вежу NORELEM [8], з якої було вирізано верхнє армування для закріплення затискача зсередини. У всіх варіантах для позиціонування заготовки використовуються плоскі центрувальні штифти Kipp, які використовуються для позиціонування деталі за отвором Ø16H7, виконаним під час першої операції [6].

2.1.1 Перша концептуальна модель пристосування

Концептуальна модель складається з восьми гідравлічних центруючих лещат HILMA DS 100 (рис. 2.1, а). У кожну затиснуто дві заготовки. Лещата прикручуються до чотирьох боків затискної вежі NOREL. Для кріплення лещат використовується вісім гвинтів M10, точне положення лещат на вежі забезпечується двома циліндричними штифтами 12m6.

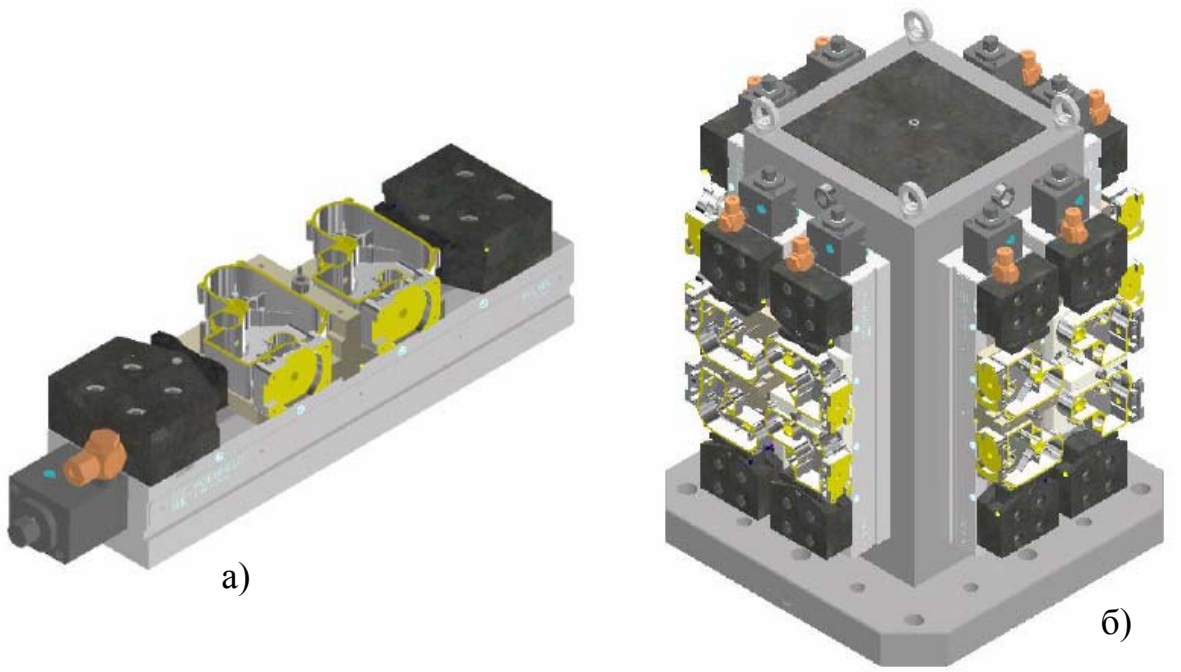


Рис. 2.1 – Лещата HILMA DS 100 із заготовками (а) та затискна вежа (б)

Гідравлічна рідина подається до пристосування зверху обробного центру. Для лещат виготовляється центральний упор, в який запресовуються два сплющені центрувальні штифти. У рухомі фіксатори вставляються обертові вставки, які оснащені скосом. Оброблену деталь розміщують через отвір на сплющеному центруючому штифті, який в одному напрямку дозволяє зупинити заготовку на кілька десятих міліметра відносно нерухомого центрального упору. Після розміщення деталі на штифті оператор постукує по заготовці гумовим молотком. Шістнадцять заготовок виготовляються за один машинний цикл. Принцип затискання показано на (рис. 2.2).

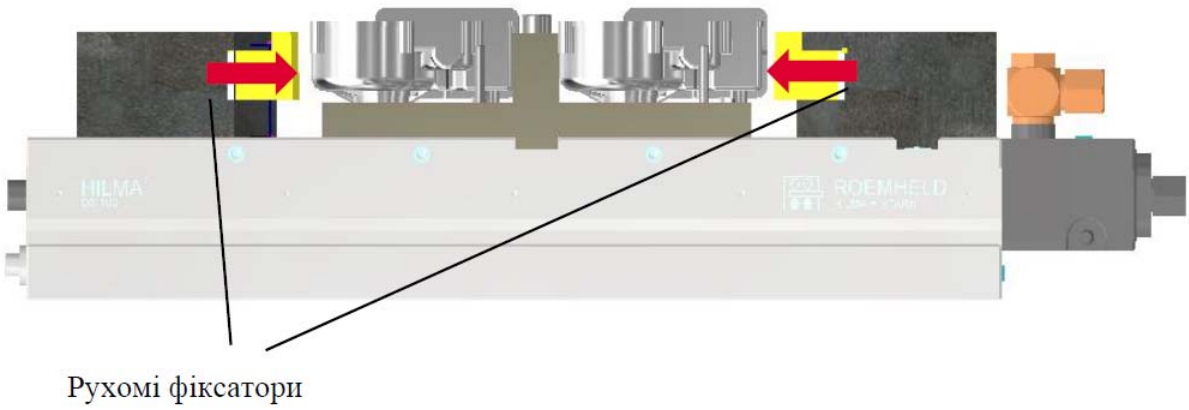


Рис. 2.2 – Принцип затискання першої концептуальної моделі

2.1.2 Друга концептуальна модель пристосування

До затискної вежі (рис. 2.3, а) прикріплено 8 гідравлічних затискачів SCHUNK KSH3-F 200. До нерухомого фіксатора затискача кріпиться затискна пластина, в яку запресовано сплющений центруючий штифт, на який розміщується компонент. Сплющений штифт дозволяє зупинити заготовку на кілька десятих секунди відносно нерухомого упору. Затискання здійснюється шляхом переміщення затискача до заготовки.

Принцип затискання показано на (рис. 2.4). Подача гідравлічної рідини до окремих пристосувань вирішується за допомогою просвердлених отворів у затискній вежі, оскільки затискачі дозволяють підключати гідравліку як збоку, так і знизу. Армування на верхній стороні дозволяє прокладати гідравлічні шланги. У листовому металевому кожусі є отвір, через який можна пропустити гідравлічні шланги. За один машинний цикл виготовляється вісім заготовок.

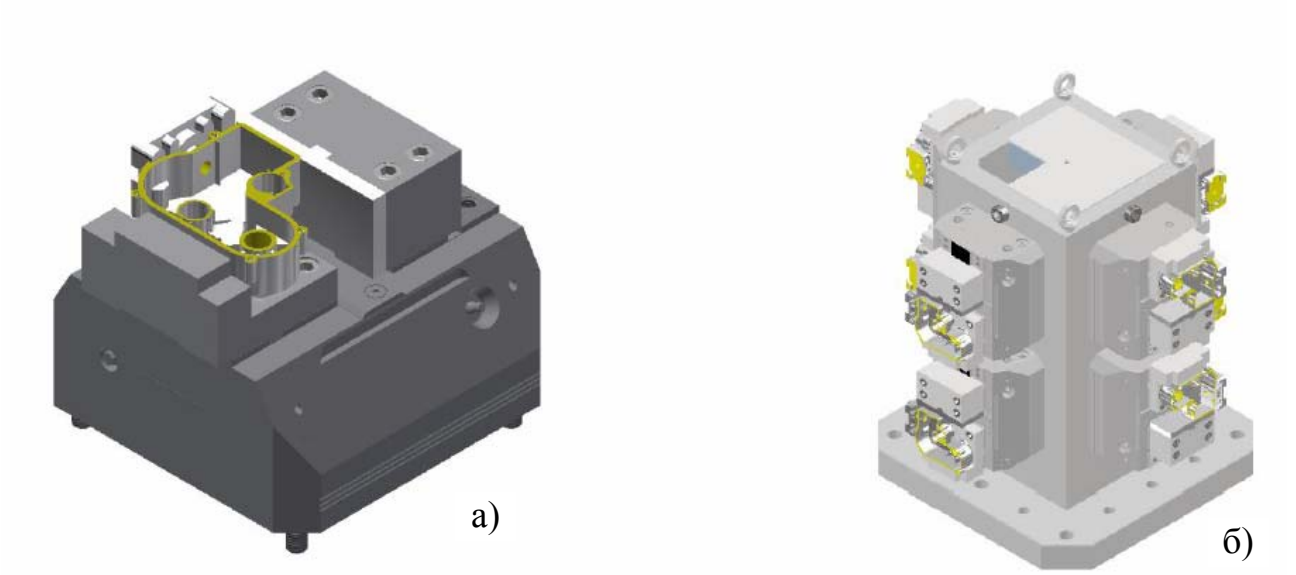


Рис. 2.3 – Гідравлічний затискач SCHUNK KSH3-F 200 з заготовкою (а) та затискна вежа (б)

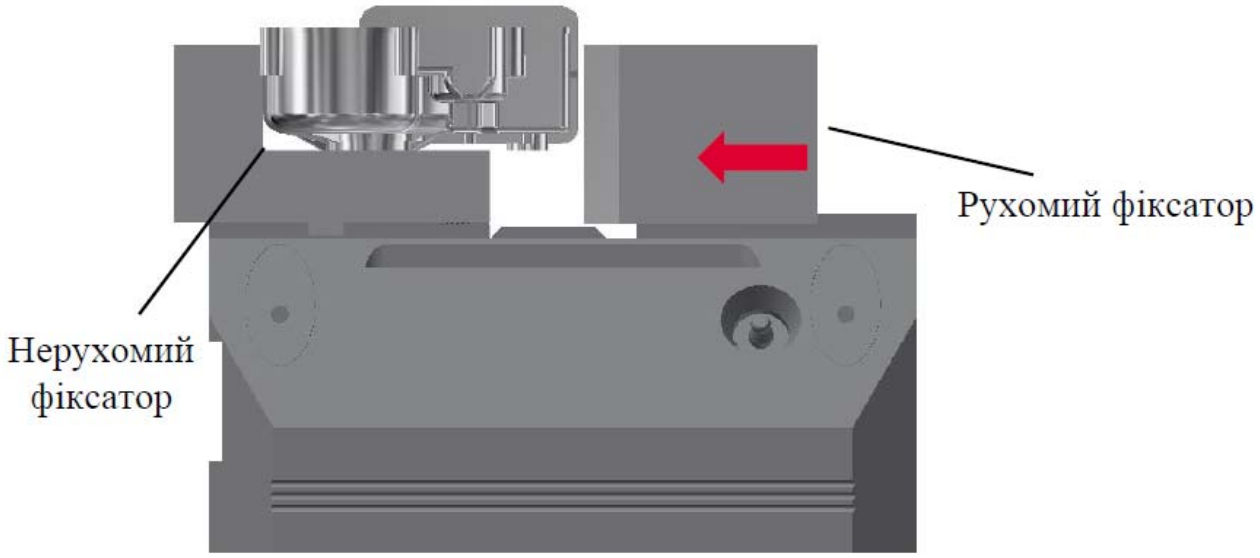


Рис. 2.4 – Принцип затискання другої концептуальної моделі

2.1.3 Третя концептуальна модель пристосування

Заготовки затискаються за допомогою клинових затискачів OK-VISE BK2-VT+3 з припуском на обробку, в яких виконується фаска. Затискне зусилля створюється гідравлічними циліндрами HA-VB1, які встановлені на внутрішній стороні вежі. Щоб мати можливість встановити гідравлічні циліндри, верхню частину вежі було зрізано фрезером та замінено пластиною. Подібно до попередніх концепцій, компонент монтується на сплющений центруючий штифт перед затисканням. Один клиновий затискач затискає дві заготовки до нерухомої щелепи. Кожна пластина з двома затискачами (рис. 2.5) затискає чотири заготовки, по одній з кожного боку револьверної головки. Шістнадцять заготовок виготовляються за один машинний цикл

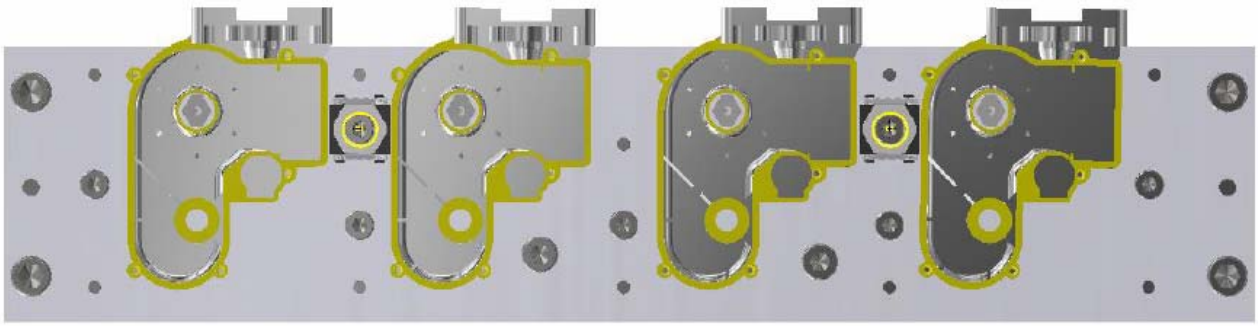


Рис. 2.5 – Затискна пластина

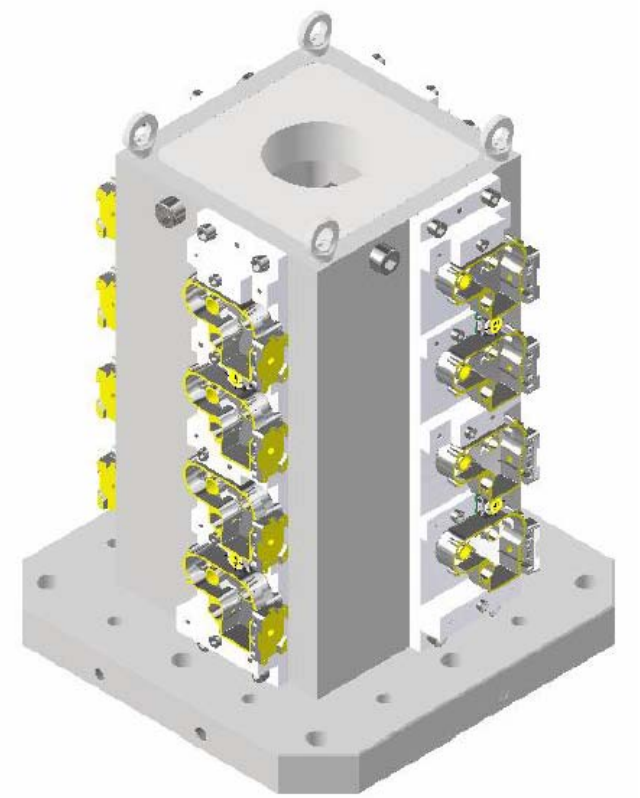


Рис. 2.6 – Затискна вежа з кріпленнями

2.1.4 Четверта концептуальна модель пристосування

Для затискання використовуються ті ж клинові затискачі OK-VISE зі скошеними фіксаторами.

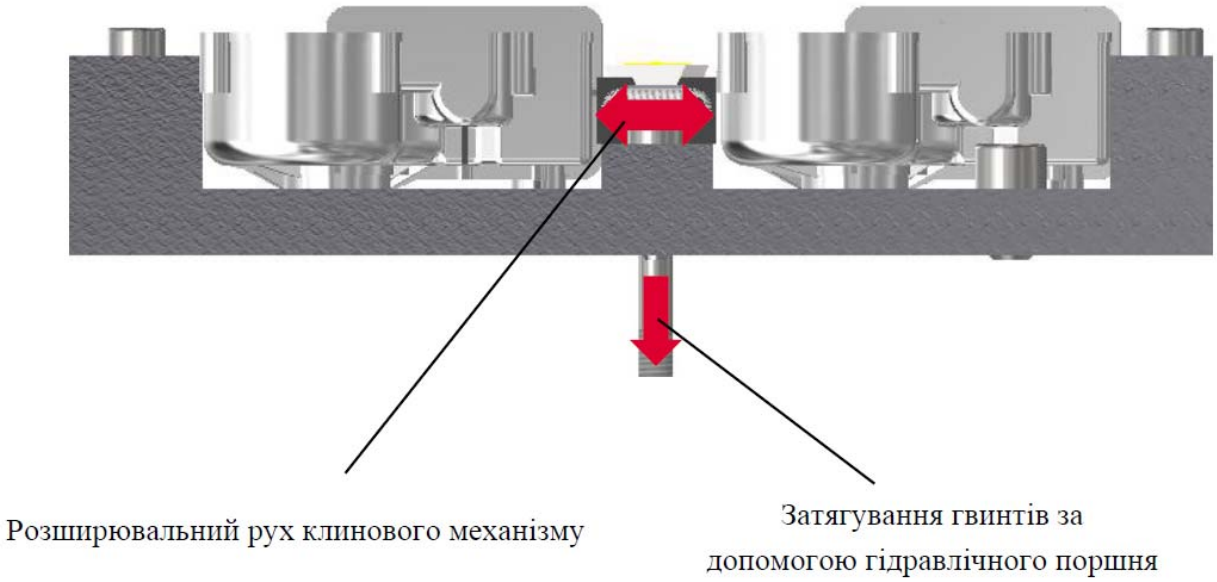


Рис. 2.7 – Принцип затискання третьої концептуальної моделі

Затискання здійснюється шляхом ручного затягування гвинтів, що розширюють клиновий механізм. Для зміни заготовок всю вежу можна зняти з верстата за допомогою крана, а заготовки можна замінити під час обробки на другій вежі. Ця концепція має найвищу щільність заготовки. За один машинний цикл виготовляється тридцять дві заготовки. У цій концепції використовуються ті ж затискні пластини (рис. 2.5), що й у попередній конструкції.

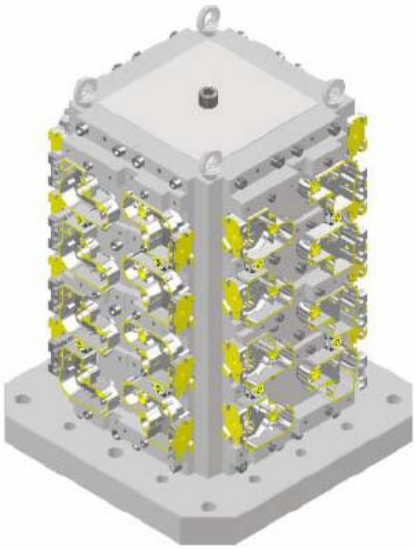


Рис. 2.8 – Затискна вежа з кріпленнями

З кожного боку вежі є по дві такі пластини. Недоліком механічного затискання є погана повторюваність затискання та збільшення зусиль оператора. Перевага цієї концепції полягає в тому, що верхню частину вежі не потрібно фрезерувати, оскільки різьба для затискних гвинтів нарізана в корпусі вежі. Принцип затискання показано на (рис. 2.8).

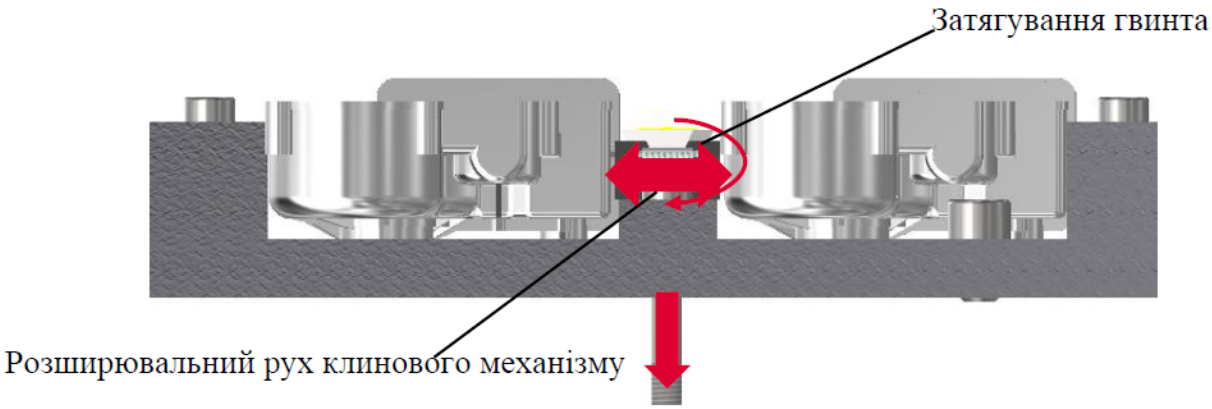


Рис. 2.9 – Принцип затискання четвертої концептуальної моделі

Концепції 1 та 2, в яких використовуються лещата легко переобладнується для іншого типу виробництва, замінивши затискачі та упор, а гідравлічні лещата можна використовувати окремо. Решту концепцій можна використовувати лише для затискання деталей однакової ширини.

Концепція 4 не підходить, оскільки використовує механічне затискання. Це не підходить для масового виробництва через зусилля оператора та низьку повторюваність затискання, яка посилюється великою кількістю операцій затискання за машинний цикл.

Концепції 3 та 4 використовують невеликі клинові затискачі, які затискають 2 заготовки одночасно. Це означає, що якщо одна заготовка має гіршу якість поверхні, пристосування обертатиметься, а інша заготовка не буде достатньо закріплена.

Тому в кінцевому варіанті обираємо першу концептуальну модель.

2.2 Конструктивне рішення фрезерного пристосування

Перше концептуальне рішення моделі (рис. 2.10) було обрано за основу. Для даної моделі необхідно провести моделювання окремих елементів, розрахувати силу різання та перевірити на деформацію процес затискання заготовки.

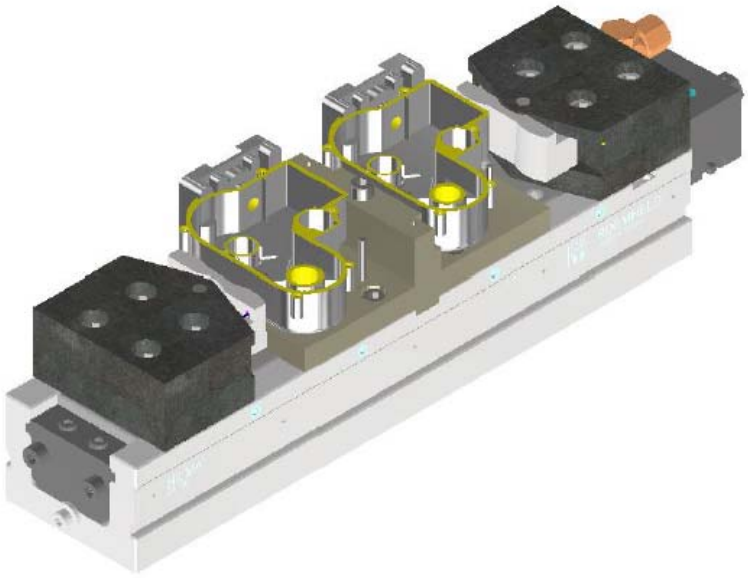


Рис. 2.10 – Обрана концептуальна модель

Базовою частиною пристосування є затискний кубик з припуском на обробку NORELEM (рис. 2.11). Він виготовлений із сірого чавуну GJL 300. З усіх боків вежі оброблено 0,5 мм. Щоб прикріпити до нього центральні лещата HILMA DS 100 з вежі необхідно зняти верхню арматуру. Щоб компенсувати втрату жорсткості на місці арматури прикріплено нове армування болтами. На верхній стороні є отвори для болтів M20 ISO 4762 (1), які використовуються для кріплення арматури. Кожні лещата кріпляться до револьверної головки вісьмома болтами ISO 4762 M10 (2), а їхнє положення встановлюється двома штифтами ISO 2338 Ø 12m6 (3). Отвір Ø50H6 знизу для циліндричного штифта використовується для точного позиціонування затискного блоку на робочому столі. Робочий стіл верстата має таку ж відстань між отворами, як і затискна головка. Сама затискна вежа, яку ще потрібно модифікувати, важить 250 кг, тому вона повинна бути оснащена транспортними вушками, які дозволять легше переміщувати вежу за допомогою крана.

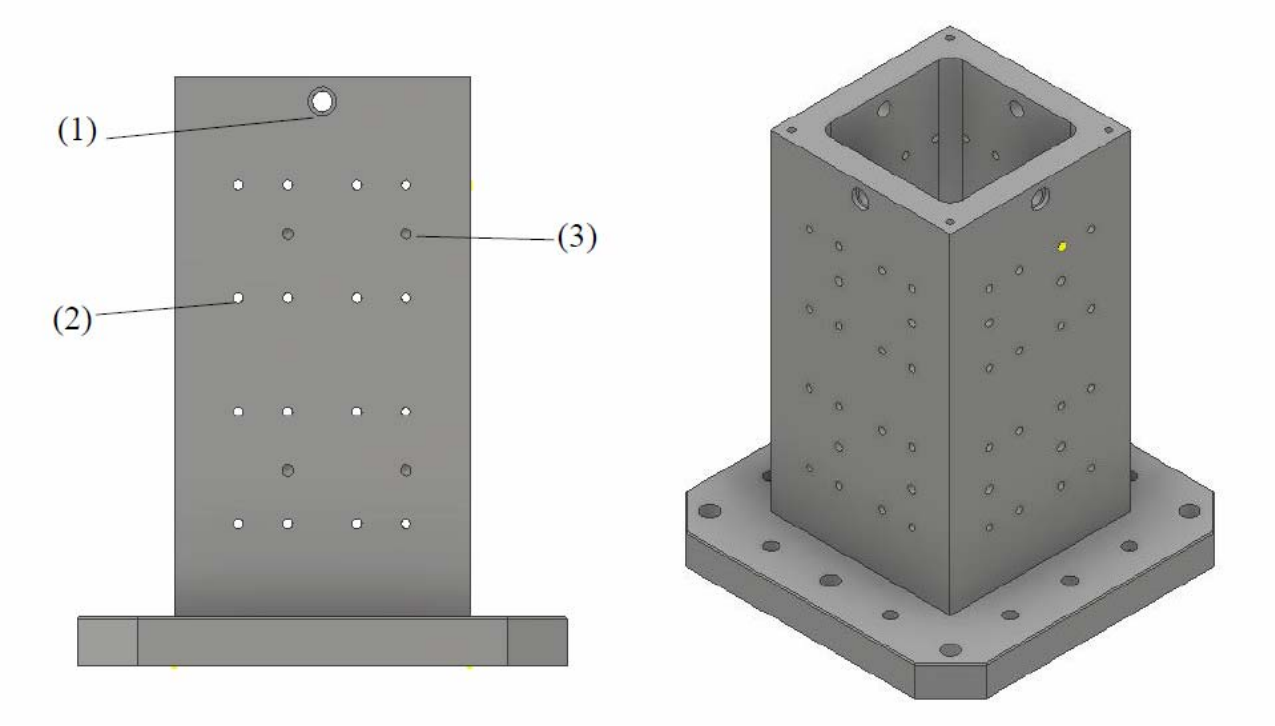


Рис. 2.11 – Модифікована вежа NORELEM

Центрувальні лещата HILMA DS 100 (рис. 2.12) використовуються для застосування затискного зусилля. Для використання з лещатами розроблені спеціальні затискачі.

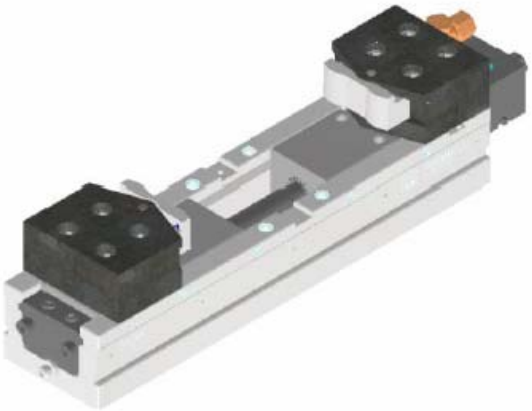


Рис. 2.12 – Центрувальні лещата із затискачами

Затискач, яка контактує з заготовкою, встановлений на циліндричному штифті Ø8 з зазором. Затискач має спеціальну форму (рис. 2.13), яка дозволяє повертати його відповідно до нерівностей заготовки.

Щоб запобігти лінійному контакту між затискачем та заготовкою,

обертовий затискач має скіс 1°, такий самий, як і на заготовці. Це збільшить поверхню контакту. Затискач гладкий, щоб запобігти пошкодженню поверхні заготовки. Повернення у вихідне положення досягається двома пружинами стиску, які розташовані в отворах обертового затискача. Обертовий затискач встановлений в ковзному блоці. Розсувний затискач має паз, який входить у паз лещат, і закріплюється чотирма болтами ISO 4762 M10.

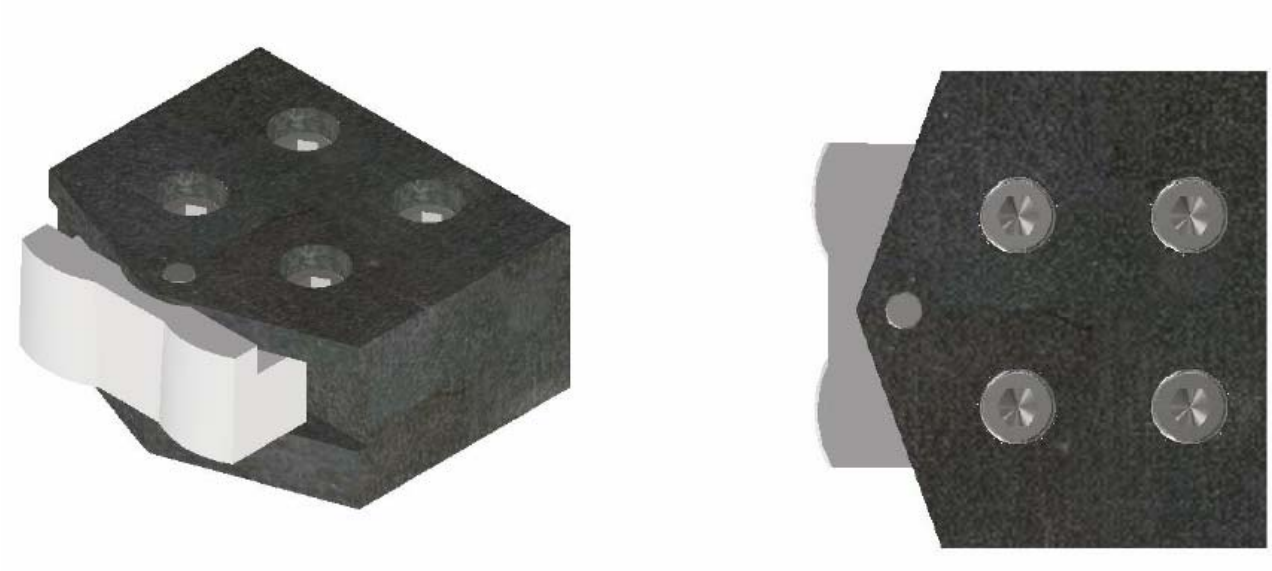


Рис. 2.13 – Вигляд затискача

2.3 Розрахунок сил різання та затиснення

Для правильного затискання необхідно розрахувати необхідне зусилля затискання. Оскільки лещата мають гідравлічний привод, необхідне зусилля можна регулювати за допомогою редукційного клапана. Необхідна сила повинна бути меншою за максимально можливу силу затискача. Водночас, затискачі не повинні занадто сильно стискати заготовку [1].

Проведемо розрахунок сили різання для фрезерування торцевою фрезою. Там очікуються найвищі сили різання, оскільки обробка виконується на найвищій швидкості різання. Умови різання наведено в (табл. 2.1.), припуск на обробку становить максимум 0,5 мм.

Таблиця 2.1 – Умови різання, необхідні для розрахунку сили різання

Діаметр фрези, D_2 мм	Швидкість, n_2 хв$^{-1}$	Швидкість різання, V_2 м/хв	Подача, f_{z2} мм	Глибина зняття, a_p мм
10	4584	288	0,12	0,5

Подача розраховується:

$$f_{Z5} = \frac{V_{f2}}{z_2 \cdot n_2}, \tag{2.1}$$

де z_2 – кількість зубів фрези.

$$f_{Z5} = \frac{1068}{2 \cdot 4584} = 0{,}12 \text{ , мм.}$$

Питома сила різання згідно з [19]:

$$k_c = 700 \text{ , МПа.}$$

Коефіцієнт товщини стружки згідно з [19]:

$$m_c = 0{,}25 .$$

Питома сила найбільша при куті подачі $\varphi = 90°$ і розраховується як:

$$k_{cf} = \frac{k_c}{\left(f_{z5} \cdot \sin\varphi\right)^{m_c}} . \tag{2.2}$$

$$k_{cf} = \frac{700}{0{,}12^{m_c}} = 1189{,}3 \text{ , МПа}$$

Максимальний номінальний розмір поперечного перерізу стружки досягається при куті подачі φ = 90° та розраховується як:

$$A_{D\max} = a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi . \tag{2.3}$$

$$A_{D\max} = 0{,}5 \cdot 0{,}12 \cdot 1 = 0{,}06 \text{ , мм}^2$$

Сила різання визначається:

$$F_c = A_{D\max} \cdot k_{cf} . \tag{2.4}$$

$$F_c = 0{,}06 \cdot 1189{,}3 = 71{,}4 \text{ , Н}$$

Тепер ми можемо визначити необхідне зусилля затиску:

$$Q = \frac{k_b \cdot F_c}{f_1 + f_2}, \tag{2.5}$$

де k_b – коефіцієнт безпеки затиску;

f_1 – коефіцієнт тертя між обробленою нижньою стороною та упором;

f_2 – коефіцієнт тертя між необробленою поверхнею та змінним затискачем.

$$Q = \frac{3 \cdot 71{,}4}{0{,}1 + 0{,}2} = 714 \text{, Н}$$

Необхідна сила затиску дуже мала порівняно з максимальною силою затиску, яка становить 25 кН. Залишається перевірити наявність відбитка на найменшій поверхні заготовки, яка контактує зі змінною губкою. Сенсорну поверхню вимірювали в Autodesk Inventor.

$$p_0 = \frac{Q}{S_D}. \tag{2.6}$$

$$p_0 = \frac{714}{495{,}6 \cdot 10^{-6}} = 1{,}44 \text{, МПа}$$

Тиск на поверхні контакту дуже низький порівняно з межею текучості сплаву, яка становить 170 МПа, що означає безпечне використання пристосування.

При затисканні заготовка деформується, що призводить до зміни положення отворів під різьбу М3. Тому необхідно виконати моделювання деформації. Якщо зміна положення отвору менша за поле допуску положення, затиск задовільний.

Аналіз деформації було виконано в Autodesk Inventor 2024 (рис. 2.14). Оригінальна 3D-модель деталі не могла бути використана, оскільки через експорт з формату .stl не було можливості створити сітку скінченних елементів. Тому було створено спрощену модель компонента, на якій було проведено аналіз. Найбільше зміщення положення отвору становить 0,1 мм, тоді як допуск положення отвору згідно з кресленням деталі становить 0,16 мм.

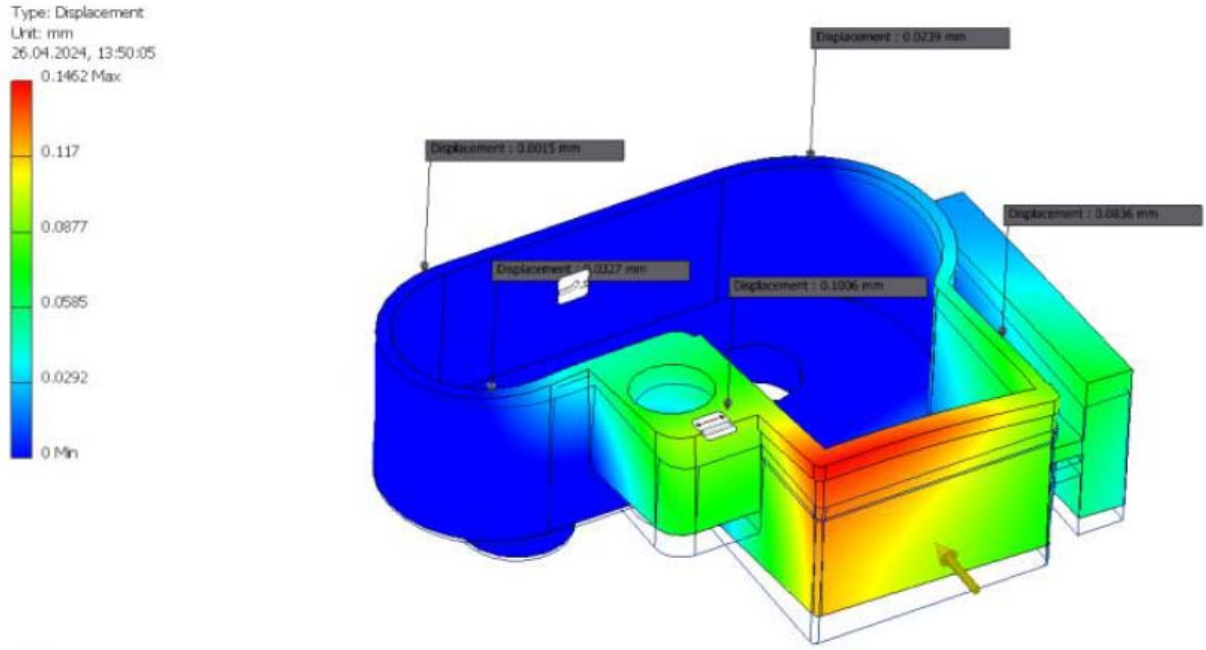


Рис. 2.14 – Деформація заготовки під час затискання

Можна використовувати обраний метод затискання та силу затискання. Розрахунок виконувався лише з боку, де щелепа тисне на меншу площу деталі, оскільки я очікую меншої деформації з іншого боку, через ребра на деталі та меншу відстань від центруючого штифта до щелепи.

Розрахунок поворотних пружин. Дві пружини стиску використовуються для повороту щелепи в її основне положення після відпускання. Під час обертання щелепи пружина з одного боку стискається, а з іншого – розслабляється. За допомогою Autodesk Inventor Professional 2024 було виявлено, що стиснення пружини Δy = 7 мм. Необхідна сила F_{poz} = 200 Н, тепер ми можемо визначити жорсткість пружини за формулою:

$$k_p = \frac{F_{poz}}{\Delta y}. \tag{2.7}$$

$$k_p = \frac{200}{0{,}007} \approx 28500 \text{, Н/м}$$

Модуль пружності пружинного дроту при зсуві становить 81500 МПа. Використовуючи ітераційний метод виявлено, що найвигідніше використовувати дріт діаметром d_p = 1,5 мм, щоб пружину можна було вільно

вставити в отвір діаметром 10 мм. Середній діаметр пружини D_p повинен бути 7,5 мм.

Розраховуємо кількість активних витків n_z:

$$n_z = \frac{G \cdot d_p^4}{8 \cdot k_p \cdot D_p^3}. \tag{2.8}$$

$$n_z = \frac{81{,}5 \cdot 10^9 \cdot 0{,}0015^4}{8 \cdot 28500 \cdot 0{,}0075^3} \approx 4 \text{., витки}$$

2.4 Центральна секція

Центральна секція складається з 2 частин (рис. 2.15): основи (1) та упору (2). Матеріал - сталь 16MnCr5, яка загартована та піддана загартуванню для підвищення зносостійкості.

Основа була спроектована якомога нижчою, щоб мінімізувати вібрацію заготовки. Положення вузла на лещатах фіксується штифтом Ø4 мм. Є два (3) отвори для штифтів, оскільки один штифт служить для визначення положення деталі на лещатах (з'єднує упор, основу та розташований в отворі Ø4E8 у лещатах), другий штифт з'єднує лише основу та упор. Обмежувач закріплено гвинтом ISO 4762 M8 (4).

Основа кріпиться до лещат чотирма гвинтами ISO 4762 M10 (5). В основу запресовуються сплющені центрувальні штифти (6), на які через отвір вставляється компонент. Для запобігання неправильній посадці використовуються циліндричні штифти (7), які запобігають посадці компонента будь-яким іншим способом, окрім як через спеціально виготовлений отвір на центруючому штифті.

З кожного боку затискної вежі розташовані два затискачі, які відрізняються лише поворотом центральної частини на 180°.

Щоб прикріпити лещата до затискної вежі зсередини за допомогою гвинтів, довелося фрезерувати верхню арматуру, що зменшило жорсткість затискної вежі.

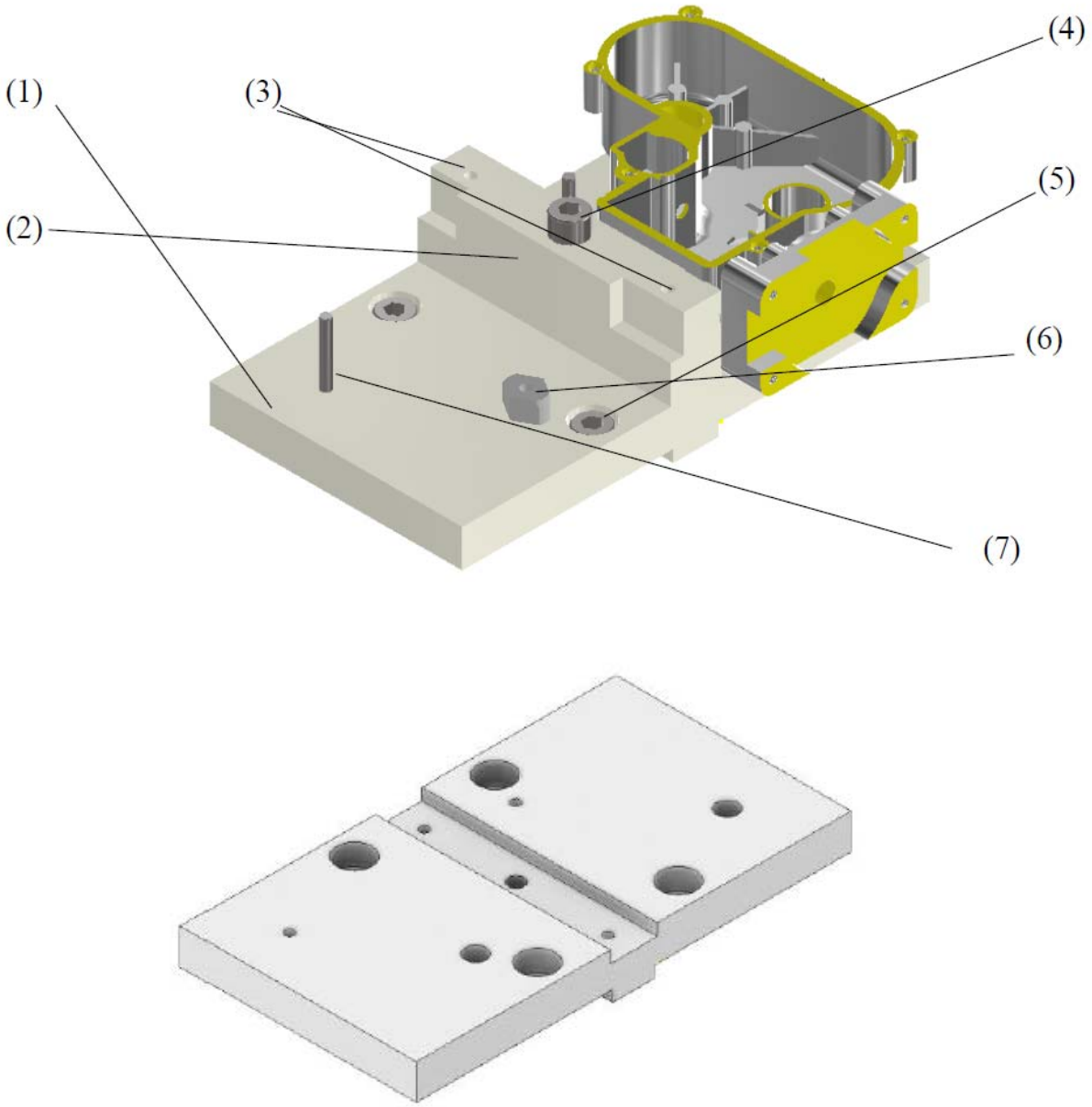
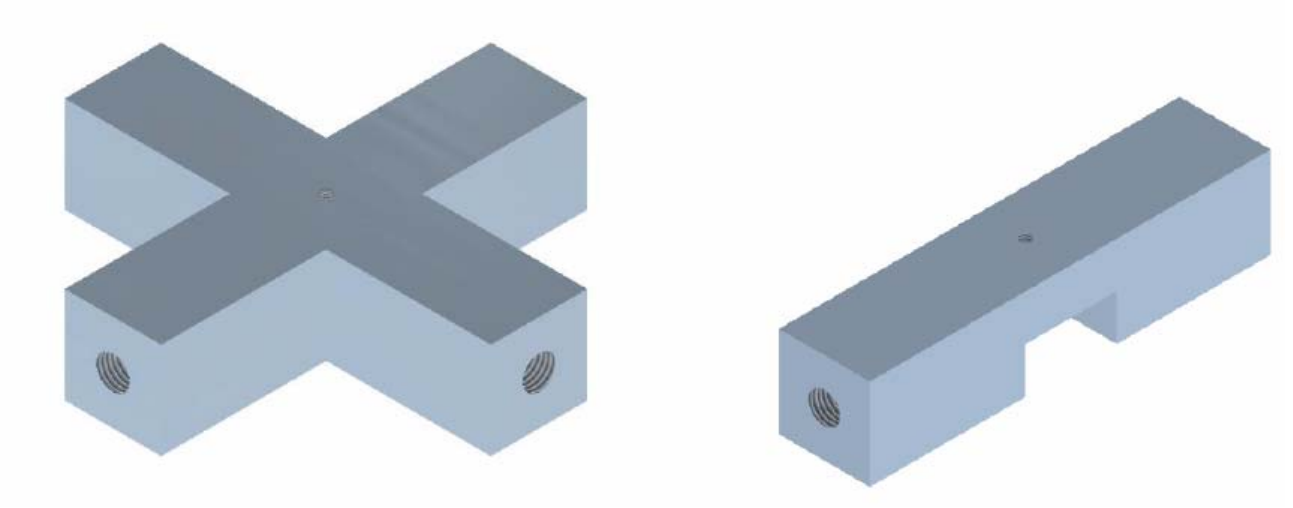


Рис. 2.15 – Центральної секції

Щоб компенсувати втрату жорсткості, на його місце було вставлено нове армування (рис. 5-8a). Для кріплення арматури використовуються чотири болти ISO 4762 M20. Для економії матеріалу арматура складається з двох частин, причому обидві частини входять одна в одну за допомогою пазу. До верхньої частини арматури кріпиться кришка з листового металу товщиною 2 мм (рис. 5-8b), яка служить для запобігання накопиченню стружки всередині вежі.



а) б)

Рис. 2.15 – Арматура затискної вежі (а) та її верхня частина (б)

2.5 Висновок до розділу

Для розрахунку деформації під час затискання була створена спрощена модель компонента без підсилення та зі спрощеною деталлю, яка служить для підключення електродвигуна. Це означає, що фактична жорсткість деталі буде більшою. При розрахунку тиску під час штампування враховувалася площа затискача, що проектується на площину, паралельну стінці заготовки. Через закруглену форму затискача фактична площа контакту буде меншою. Напруження під час стискання було розраховано як невелике, лише 1,44 МПа, тому фактичне напруження буде вищим, але не настільки, щоб виникла залишкова деформація.

Проблема полягає у вазі всієї конструкції, яка становить 474 кг, з 16 заготовками майже 480 кг. Не враховано вагу гідравлічної рідини та шлангів, а також поглинання сили різання. Вантажопідйомність столу в базовій версії верстата становить 500 кг. Збільшення ваги столу погіршу показник швидкості його обертання порівняно з каталожним значенням. Було б краще використовувати той самий верстат, але з додатковим посиленим столом, вантажопідйомністю 700 кг.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Метою даної бакалаврської роботи було проектування затискного пристрою для фрезерування заготовки шестерні автомобільного склоочисника на чотиривісному верстаті з ЧПК, враховуючи мінімальні витрати та простої під час виробництва. Проміжними цілями були проведення пошуку комерційно доступних продуктів, аналіз проблеми, розробка концептуального рішення та перетворення обраної концепції дизайну на креслярську документацію. Всі основні та цілі було досягнуті.

У дослідженні коротко охарактеризовано затискні пристрої та вимоги до їх конструкції. Потім були представлені можливості позиціонування заготовки та проведено пошук доступних пристосувань. Згодом було показано кілька придатних для виробництва верстатів з ЧПК.

В роботі розраховано силу необхідну для надійного затискання, що становить 714 Н. Проведено перевірочні розрахунки тиску на контакту поверхню між затискачем та заготовкою. Результати розрахунків показали, що тиск незначний, а деформація заготовки, яка може спричинити зміну положення різьбових отворів, становить лише 0,1 мм і менша за значення допуску на кресленні деталі.

Подальші вдосконалення можуть включати роботизовану руку, яка використовуватиме спеціальні тримачі для затискання та видалення кількох деталей одночасно. Це дозволило б досягти ще більшої продуктивності.

Ефективність розробки та впровадження у виробництво універсального фрезерного пристосування обґрунтовується рентабельністю, яка становить 46,69 %.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Медведєв В. С. Технологічна оснастка : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» / Укл. В. С. Медведєв, В. І. Тулупов, С. Г. Онищук. Краматорськ : ДДМА, 2021. 108 с.

2. Петров О. В. Технологічна оснастка : навчальний посібник / О. В. Петров, С. І. Сухоруков. Вінниця : ВНТУ, 2018. 123 с.

3. Міренський І.Г. Основи технології машинобудування : навч. посіб. / І.Г. Міренський. Х. : Тимченко, 2008. 256 с.

4. Вертикальна призма. URL: https://www.norelem.com/cz/en/Products/Product-overview/Flexible-standard-component-system/02000-Self-aligning-pads-Fixture-feet-Clamp-rests-Support-elements/Support-elements/02388-05-V-block-vertical.html (дата звернення 5.04.2025).

5. Регульовані опорні рейки. URL: https://www.norelem.com/cz/en/Products/Product-overview/Flexible-standard-component-system/04000-Clamp-straps-Clamping-devices/Clamping-jaws-Edge-clamps-Tension-nuts-and-screws/04512-Seating-blocks-adjustable.html (дата звернення 10.04.2025).

6. Центрувальні штифти. URL: https://www.kipp.com/gb/en/Products/Operating-parts-standard-elements/Support-elements-positioning-elements-stop-elements/K0354-Free-milled-positioning-pins-ground.html (дата звернення 10.04.2025).

7. Обробка деталей на ЧПК. URL: https://cnc-shift.com/vyrobnytstvo-ta-inzhynirynh-posluhy/obrobka-chpk-posluhy/ (дата звернення 12.04.2025).

8. Затискні блоки. URL: https://www.norelem.com/cz/en/Products/Product-overview/Flexible-standard-component-system/Subplates-Discs-Profiles-Angle-plates-Tombstones/Tombstone-cubes/01850-Workholding-cubes-grey-cast-iron-with-pre-machined-clamping-faces.html (дата звернення 15.04.2025).

9. Double clamping system DS 100. URL: https://ws.roemheld.de/en/products/double-clamping-system-ds-100~prr1Kv4WdOZY. (дата звернення 17.04.2025).

10. Гідравлічні лещата. URL: https://schunk.com/se/en/workpiece-clamping-

technology/clamping-force-blocks/hydraulic-clamping-force-blocks/ksh3/ksh3-f-200/p/000000000001486545. (дата звернення 20.04.2025).

11. Tower Workholding Systems HILMA.SCT. URL: https://ws.roemheld.de/en/products/tower-workholding-systems-hilma-sct~psjLOV3Aj7gn?characteristics%5B140%5D=Turmspannsystem+4+x+90%C2%B0. (дата звернення 23.04.2025).

12. TOBE, Frank. Kurt SeraLock Towers And WedgeLock and MoveLock Modules. URL: https://www.designworldonline.com/kurt-seralock-towers-wedgelock-movelock-modules-provide-high-density-flexible-workholding/ (дата звернення 25.04.2025).

13. Магнітна плита MASTERMILL. URL: https://e-siltech.com.ua/product/wc30epm5v0041/?srsltid=AfmBOorrz1x4LFhKK9QigTXSHUOM-1D_MVvPxDZneoMfwXOBD7Ezn5wz (дата звернення 1.05.2025).

14. Електромагнітний затискач BJP. URL: https://www.siltech.com.ua/catalogs/walmag/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%20%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D0%BA%D1%83%20%D1%82%D0%B0%20%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D1%96%D0%BD%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F_UA.pdf (дата звернення 1.05.2025).

15. Моделі FANUC ROBODRILL. URL: https://www.fanuc.eu/ua/uk (дата звернення 4.05.2025).

16. ZPS MCV1060i. URL: https://www.tajmac-zps.cz/mcfv-1060-en (дата звернення 6.05.2025).

17. EC-500 Series flyer. URL: https://www.haascnc.com/content/dam/haascnc/assets/seriesflyers/21.06_ec_400_500_4-pager_39-20032.pdf (дата звернення 7.05.2025).

18. Okuma Space Center MA-400HA. URL: https://www.okuma.eu/products/by-process/milling/ma-h-series/ma-400ha/ (дата звернення 10.05.2025).

19. Дмитрів В. Системи автоматизованого проектування. AUTODESK INVENTOR: навчальний посібник / В. Дмитрів, І. Дмитрів, Р. Городняк, М. Карп, Е. Клімов. – Львів: «Сполом», 2022. – 284 с.

20. Топільницький В. Г. Основи автоматизованого проектування в AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL. Частина 1: навчальний посібник / В. Г. Топільницький, Д. П. Ребот. – Львів: «Сполом», 2022. – 188 с.