

УДК 621.9-1/9:004.9
КП
№ держреєстрації 0117U002252
Инв. №

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
(СумДУ)
40007, г. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2; тел.+38(0542) 33-41-08,
info@sci.sumdu.edu.ua

ЗАТВЕРДЖЕНО
Проректор з наукової роботи
д-р. фіз - мат. наук, професор
_____ А.М. Черноус

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РАБОТУ
ІНТЕГРОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ
МОДУЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОСНАСТКИ
(остаточний)

Начальник НДЧ
канд. фіз. - мат. наук, с.н.с.

Д.І. Курбатов

Керівник НДР
провідний науковий співробітник
д-р. техн. наук, доцент

Д.В. Криворучко

2018

Рукопис закінчено 18 грудня 2018 р.

Результати цієї роботи розглянуті на вченій раді СумДУ, протокол від 27.12.2018 р. № 7

СПИСОК АВТОРІВ

Старший науковий співробітник, д-р. техн. наук (Керівник НДР)	18.12.2018	Д.В. Криворучко (Вступ, Розділи 1-5, Загальні висновки)
Молодший науковий співробітник, (Відповідальний виконавець)	18.12.2018	А.О. Нешта (Реферат, Розділ 1)
Старший науковий співробітник, канд. техн. наук	18.12.2018	В.О. Іванов (Розділ 1, 3-5, Підрозділ 2.3)
Старший науковий співробітник, канд. техн. наук	18.12.2018	С.В. Швець (Реферат, Розділ 1, Підрозділи 2.1, 2.2)
Науковий співробітник, канд. техн. наук	18.12.2018	І.М. Дегтярьов (Розділ 1, 3, 4)
Науковий співробітник, канд. техн. наук	18.12.2018	В.О. Колесник (Розділ 1)
Молодший науковий співробітник, канд. техн. наук	18.12.2018	І.В. Павленко (Підрозділи 3.2, 3.3, 5.3)
Інженер 2 к.	18.12.2018	В.Г. Фортонюк (Розділ 1)
Лаборант	18.12.2018	К.О. Дрофа (Підрозділ 5.3)
Лаборант	18.12.2018	В.С. Капанайко (Розділ 1)
Лаборант	18.12.2018	А.І. Кармаза (Підрозділ 2.3)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 158 с., 33 табл., 101 рис., 18 формул, 90 джерел.

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ, ПРОГРАМА ДЛЯ ВЕРСТАТА З ЧПК, РІЗАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ, ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОСНАЩЕННЯ, ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ МОДУЛЬ.

Об'єкт дослідження - процес проектування та виготовлення модульної технологічної оснастки.

Мета роботи – підвищення продуктивності обробки матеріалів у серійному та масовому машинобудуванні.

Предмет дослідження - автоматизований синтез і обробка на високоавтоматизованому обладнанні з ЧПК при виготовленні верстатних пристроїв і різальних інструментів.

Методи дослідження - основи технології машинобудування, основні положення теорії різання, метод скінчених елементів.

Розроблені керуючі програми для обробки яких розроблені та оптимізовані заздалегідь для даного конкретного верстата, а процес проектування РІ зводиться до створення інформаційної бази даних розміщення стандартних конструктивних елементів відповідно до прийнятої схеми формоутворення. Досягнуто, що виготовлення РІ можливо в автоматичному режимі на верстатах із ЧПК за керуючою програмою, що є сукупністю оптимальних технологічних рішень заздалегідь розроблених для кожного конструктивного елемента і лише адаптованих до конкретних виробничих умов. САПР ВП розглянуті як сукупність функціональних модулів різного призначення (базуючий, затискний, опорний), на основі яких можуть бути сформована множина варіантів компонувань ВП. Розроблена методика проектування дозволила у автоматизованому режимі знаходити найвигідніші проектні рішення для конкретних виробничих умов, на основі сформованої бази даних.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Огляд стандартних конструктивних елементів модульного технологічного оснащення відомих виробників	9
1.1 Проблеми сучасного серійного машинобудівного виробництва	9
1.2 Гнучкість модульного технологічного оснащення.....	13
1.3 Точність модульного технологічного оснащення	23
1.4 Мета та задачі науково-дослідної роботи.....	39
1.5 Висновки	40
2 Особливості автоматизованого проектування модульної технологічної оснастки на прикладі різального інструменту	41
2.1 Класифікація типових поверхонь різального інструменту для закріплення змінних непереточуваних пластин	41
2.2 База даних елементарних поверхонь різального інструменту	55
2.3 Автоматизоване проектування модульної технологічного оснащення ..	63
2.4 Висновки	76
3 Оптимізація структури технологічного процесу обробки елементів модульного технологічного оснащення.....	77
3.1 Методика проведення та виявлення резервів оптимізації модульного технологічного оснащення.....	77
3.2 Оптимізація технологічного процесу обробки модульного технологічного оснащення.....	83
3.3 Дослідження модульного технологічного оснащення для типового технологічного процесу методами чисельного моделювання	89
3.4 Висновки	103
4 Методика, алгоритм та програма адаптування стандартних керуючих програм для ЧПК під конкретні виробничі умови	105
4.1 Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану різального інструменту під змінні непереточувані пластини	105

4.2	Експериментальні дослідження частот власних коливань різального інструменту під змінні непереточувані пластини	111
4.3	Виконання експериментальних досліджень механічної обробки та оцінювання точності обробки корпусу різального інструменту під змінні не переточувані пластини.....	115
4.4	Висновки	124
5	Комп'ютерна реалізація системи автоматизованого проектування технологічного оснащення.....	125
5.1	Комп'ютерна реалізація САПР різального інструменту зі змінними непереточуваними пластинами.....	125
5.2	Схема бази даних	126
5.3	Комп'ютерна реалізація САПР верстатних пристроїв.....	135
5.4	Висновки	147
	Висновки	148
	Перелік джерел посилання	149

ВСТУП

У сучасному машинобудуванні основним викликом є протиріччя між необхідністю зменшення витрат часу на проектування та виготовлення виробів та ускладненням їх конструкції. За останні 15 років номенклатура виробів збільшилася більше ніж у 2 рази, їх складність постійно підвищується, зростають вимоги до точності та якості виробів [1, 2]. Сьогодні ринок потребує більше різновидів продукції, а, отже, обладнання та процеси повинні бути більш гнучкими, щоб забезпечити потреби ринку та скоротити витрати часу виходу продукції на ринок. Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є застосування модульної технологічної оснастки (ТО), яка складається з високоуніфікованих функціональних модулів, у т.ч. віртуальних. Найбільші витрати часу пов'язані з проектуванням та виготовленням верстатних пристроїв (ВП) і різального інструмента (РІ), як елементів технологічної оснастки [3], а також при розробленні керуючих програм для багатокоординатних верстатів із ЧПК. Не дивлячись на широке використання сучасних CAD/CAM систем, на цих етапах необхідно виконати значний обсяг робіт із адаптування стандартних рішень до конкретної конструкції різального інструменту.

Застосування РІ зі ЗНП є сучасним трендом у інструментальному виробництві. Це зумовлено можливістю створення змінних різальних кромок з особливими властивостями, покриттями, геометрією, що у сукупності забезпечують підвищення стійкості РІ, зменшення часу відновлення його працездатності та собівартості обробки. Разом із тим проектування та виготовлення корпусів таких інструментів потребує значних витрат часу, пов'язаних із необхідністю створення 3D моделей виробів, розробленням керуючих програм, обробкою та контролем, що для спеціальних РІ є критичним з точки зору впровадження. Застосування модульних ВП є ефективним рішенням в умовах сучасного машинобудування, оскільки скорочуються витрати часу при переході до обробки деталей іншого типорозміру. Це обумовлено використанням високоуніфікованих функціональних модулів. Враховуючи, що компонування

ВП є складними технічними системами, які відрізняються за рівнем гнучкості, технологічними можливостями і вартістю, вибір найвигіднішого ВП серед множини конкуруючих варіантів для конкретних виробничих умов є трудомістким процесом, який доцільно автоматизувати.

Метою проекту є скорочення часу від замовлення до виготовлення спеціальної модульної технологічної оснастки (ТО) на основі створення інтегрованої технології.

Основними практичними задачами проекту є:

- аналіз конструкцій відомих стандартних та спеціальних різальних інструментів (PI) із змінними непереточуваними пластинами (ЗНП), елементів верстатних пристроїв (ВП) з метою розроблення класифікатору стандартних конструктивних елементів;

- аналіз існуючих САПР PI, САПР ВП, їх структур і методик проектування;

- створення бази даних номенклатури виробів світових виробників PI та ВП, а також систематизація інформації конструкторсько-технологічного, загальноінженерного, нормативно-довідкового та оптимізаційно-розрахункового характеру;

- розроблення оптимальної структури технологічного процесу обробки PI у цілому та сукупності керуючих програм для обробки конструктивних елементів із бази даних;

- розроблення системи адаптування стандартних технологічних рішень під конкретні виробничі умови;

- експериментальна перевірка розробленої методології, алгоритмів та програмних модулів, комп'ютерна реалізація та оцінка економічної ефективності розробки.

Об'єкт дослідження - процес проектування та виготовлення модульної технологічної оснастки.

Предмет дослідження - автоматизований синтез і обробка на високоавтоматизованому обладнанні з ЧПК при виготовленні верстатних пристроїв і різальних інструментів.

Методи дослідження - основи технології машинобудування, основні положення теорії різання, метод скінчених елементів. Результати роботи базуються на теоретичних основах технології машинобудування, побудові структури ТП, основах проектування ВП. Аналітичні методи дослідження точнісних можливостей ВП виконано на основі теорії точності та теорії базування деталей. Визначення пружних переміщень, власних частот та амплітуд коливань у ВП здійснюється шляхом дослідження напружено-деформованого стану, модального та гармонічного аналізів відповідно з використанням методу скінчених елементів. Достовірність теоретичних розробок підтверджено результатами експериментальних досліджень, виконаних у лабораторних та виробничих умовах.

Результати науково-дослідної роботи впроваджено у виробництво при виготовленні фрез дискових ЭНЕСИ 50.080.001.01, ЭНЕСИ 50.080.000.02, MFH16-W15-03-2 на механічній дільниці ПАТ «Роменський завод «ТРАКТОРОЗАПЧАСТИНА» (м. Ромни). Виробничі випробування підтвердили ефективність запропонованого підходу до проектування та виготовлення фрезерних інструментів за допомогою розробленого додаткового модуля до САД системи SolidWorks, який забезпечує проектування спеціального різального інструменту зі змінними непереточуваними пластинами.

Результати науково-дослідної роботи впроваджено у навчальний процес, при викладанні навчальних дисциплінах «Технологічна оснастка: комп'ютерні технології проектування» та «Математичне моделювання технологічних процесів», для студентів денного відділення за освітньо-кваліфікаційним рівнем «бакалавр» напряму підготовки 131 Прикладна механіка, та у магістерських дипломних роботах за темами: «Підвищення ефективності верстатних пристроїв для обробки деталей паперорізальних машин» студент Васюточкін І.В., «Підвищення ефективності технологічних процесів автоматизованого складання виробів» студент Серета О.В.

1 ОГЛЯД СТАНДАРТНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОДУЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОСНАЩЕННЯ ВІДОМИХ ВИРОБНИКІВ

У розділі приведено огляд результатів досліджень у галузі проектування верстатних пристроїв виконано аналіз конструкторсько-технологічних характеристик деталей складної форми, а також визначено особливості проектування ВП для їх установа. Розглянуто та проаналізовано види гнучкості, виявлено взаємозв'язок між ними та елементами технологічної системи «верстат – ВП – різальний інструмент – заготовка». Обґрунтовано та систематизовано розподіл гнучкості за категоріями кількісної та якісної її складових. Також проаналізовано критерії оцінювання та визначено методи дослідження статичної та динамічної точності ВП.

1.1 Проблеми сучасного серійного машинобудівного виробництва

У даний час у світовому машинобудуванні найбільш розповсюдженим типом виробництва є середньосерійний тип виробництва. Тенденціями до розвитку ефективного виробництва в Україні та світі є:

- збільшення номенклатури виробів;
- зменшення непродуктивних витрат часу (допоміжного та підготовчо-заклучного);
- поширення багатокоординатних верстатів із ЧПК;
- скорочення кількості технологічної оснастки.

Проте однією з проблем сучасного серійного виробництва є збільшення номенклатури виробів, що потребує ускладнення проектно-конструкторських робіт із виготовлення технологічної оснастки, особливо ВП. Багатономенклатурність виробництва зумовлює часті переналагодження на обробку деталей іншої партії, що ставить питання про економічну доцільність проектування та виготовлення спеціальних ВП, тому актуальним є розроблення

гнучких ВП, що мають здатність до переналагодження на інший типорозмір у межах, визначених його технічними характеристиками та можливість установлення конструктивно подібних деталей.

Також залишається актуальною проблема інструментальної доступності під час обробки максимальної кількості поверхонь деталі за один установ, що зумовлена, як правило, конструкцією ВП, що не дозволяє здійснити безпечний підхід до оброблюваної поверхні без уникнення зіткнень з функціональними елементами ВП. В основному такі ВП є спеціальними та розраховані на виконання однієї операції або навіть одного переходу для обробки деталей на універсальних або спеціалізованих верстатах. Проте у зв'язку зі стрімким поширенням багатокоординатних верстатів із ЧПК та скороченням витрат часу на виготовлення продукції при одночасному збільшенні ступеня складності готових виробів, що наглядно проілюстровано наступним чином (рис. 1.1) [6] виникає необхідність у ВП, що забезпечують можливість виконання багатокоординатної обробки при достатній інструментальній доступності.

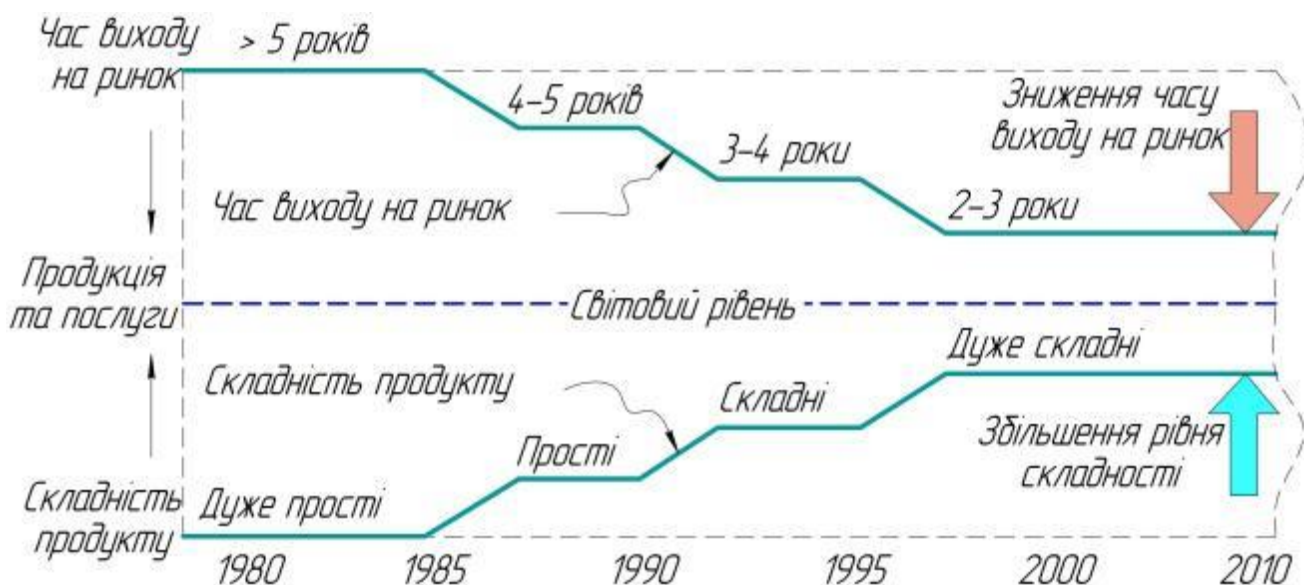


Рисунок 1.1 – Сучасна тенденція зміни рівня складності продукції та часу її виходу на ринок

Обладнання для механічної обробки деталей складної форми.

У даний час, в умовах швидкого впровадження інноваційних технологій у машинобудуванні, використання металорізального обладнання, яке відповідає сучасним стандартам, є невід'ємною частиною кожного машинобудівного підприємства. Рациональний вибір верстатів та їх ефективне використання дозволяє випускати конкурентоспроможну продукцію. Проведений статистичний аналіз верстатів свердлильно-фрезерно-розточувальної групи для огляду тенденцій розвитку та розподілення номенклатури обладнання та його ринку і можливості прогнозування ситуації у даній галузі наперед [7].

Для отримання достовірної оцінки проаналізовано металорізальне обладнання всесвітньо відомих верстатобудівних компаній з Японії, Німеччини, Китаю, США, Індії, Кореї, Франції, Італії, Тайваню. Об'єктом дослідження стали обробні центри, багатоцільові верстати з ЧПК, верстати з ЧПК, а також універсальні верстати, що належать до свердлильної, фрезерної та розточувальної груп як вертикального (817 моделей), так і горизонтального компонування (258 моделей). Статистичний аналіз виконувався при розгляді обладнання за основними параметрами: робочий стіл верстата (L x B), мм; робочий простір (від торця шпинделя до поверхні стола), мм; максимальна частота обертання шпинделя, об/хв.; максимально допустиме навантаження на стіл (рівномірно розподілене), кг; потужність верстата, кВт; кількість керованих осей.

Виконавши аналіз отриманих даних за основними показниками, виявили, що: близько 50% верстатів вертикального компонування мають робочий стіл шириною 250–630 мм, довжиною до 1200 мм, а максимально допустиме навантаження на робочий стіл верстата не перевищує 1000 кг. Близько 50% верстатів горизонтального компонування мають робочі столи шириною до 800 мм та довжиною 800–2000 мм. 42% верстатів горизонтального компонування забезпечують максимально допустиме навантаження на робочий стіл до 2000 кг. Близько 50% верстатів мають частоту обертання шпинделя від 5000 до 10000 об/хв. 82% верстатів горизонтального компонування забезпечують частоту обертання шпинделя до 8000 об./хв. Майже у 66% проаналізованих верстатів вертикального компонування та 44% верстатів горизонтального компонування

потужність головного приводу не перевищує 20 кВт. Аналіз верстатів за місткістю інструментальних магазинів показав, що 93% верстатів вертикального компонування та 75% верстатів горизонтального компонування здатні розмістити до 40 різальних інструментів. Щодо кількості керованих осей координат, то 50% свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів мають до трьох осей, 35% – до чотирьох осей та 15% до п'яти осей координат [8].

Отримані узагальнюючі дані дозволили визначити основні тенденції розвитку у верстатобудуванні на найближчі роки, що можна представити у наступному[8–11]:

- подальше вдосконалення інтеграції процесів створення та використання верстатобудівної продукції, яке забезпечується накопиченим досвідом створення баз знань і баз даних, керованих ЕОМ останнього покоління.

- використання високих швидкостей головних і допоміжних рухів при малих величинах дискретності переміщень і точності позиціонування за керованими координатами;

- підвищення потужності приводу головного руху з забезпеченням високої жорсткості, вібростійкості та термостійкості обладнання, зокрема, за рахунок вібростійкості нових матеріалів для несучих елементів верстатів і застосування віброгасників різних конструкцій;

- використання продуктивного та зносостійкого інструменту з наявністю засобів контролю та діагностики його стану;

- забезпечення мобільності створення різних модифікацій базових моделей обладнання відповідно до вимог замовлення;

- подальше збільшення концентрації технологічних переходів на кожній одиниці обладнання, у тому числі із забезпеченням послідовного виконання попередньої і остаточної обробки;

- забезпечення гнучкості обладнання, керованого за допомогою СЧПК, і в тому числі працюючого в інтегрованому виробництві з програмою, яка часто змінюється, наприклад, за рахунок можливості децентралізації управління для реалізації нових вимог;

– інтенсивний розвиток керованих за допомогою комп'ютерної техніки електрофізикохімічних методів високопродуктивної та точної обробки нових важкооброблюваних матеріалів і деталей складної форми;

– вдосконалення різних способів надточної обробки, зокрема, з використанням нанотехнологій;

– створення обладнання нового покоління, що забезпечує виготовлення на одній робочій позиції виробів дуже складної форми, зокрема, із застосуванням гексаподів, що реалізують до шести керованих координат.

На даний час у світі розвиваються різні підходи до проектування та дослідження ВП для операцій механічної обробки деталей різних класів. Для визначення сучасного стану досліджень у галузі проектування ВП та виявлення актуального напрямку досліджень розглянуто основні галузі та підходи до проектування, а саме, дослідження точності, жорсткості, гнучкості, контактної взаємодії між елементами ВП та заготовкою, етапи проектування, аналіз, синтез і оптимізація компонувань ВП, дослідження дво- і тривимірних моделей заготовок з урахуванням динамічних параметрів.

1.2 Гнучкість модульного технологічного оснащення

В умовах багатомоделного виробництва гнучкість є одним із найважливіших показників, який характеризує ефективність використання ВП для обробки широкої номенклатури деталей. Проте, визначення лише одного поняття гнучкості, сформованого як такого, в літературі на даний час не існує. Тому у роботі проаналізовані різні трактування даного поняття, виділені спільні риси та запропоновано єдиний узагальнюючий термін, що є актуальним у сучасних виробничих умовах, а саме, що гнучкість – це здатність ВП до переналагодження (шляхом заміни або регулювання) його елементів у межах заданих технічних характеристик для обробки визначеної номенклатури оброблюваних деталей [12].

Дослідженням гнучкості технічних систем займалися В. М. Авдеєнко, М. Х. Блехерман, С. Г. Бондаренко, В. М. Васильєв, Є. С. Пуховський,

А. В. Проскуряков, В. М. Стівенсон, Z. Bi, C. R Gomez Valdez, E. Eraslan, M. Kurt, M. Sherman та ін. У процесі огляду праць вищевказаних вчених встановлено, що технічні системи можуть бути класифіковані за ступенем гнучкості на системи: з ручним керуванням, переналагоджувані, гнучкі, спеціальні, автоматизовані [13–15].

Одним із важливих аспектів у гнучкості є її розгляд із позиції забезпечення гнучкості виробничого потенціалу або з позиції здатності всієї організації до реагування на зміни попиту. У першому випадку приділяють увагу технічній та технологічній гнучкості, залишаючи при цьому слабо висвітлену проблему розроблення нової продукції, а у другому – навпаки.

Гнучкість, як властивість виробничої системи, має шість основних ознак [16]:

- 1) повторюваність – здатність системи багаторазово повертатися до виконання раніше освоєних робіт після завершення даної роботи;
- 2) універсальність – можливість переналагодження на обробку іншої номенклатури деталей, різних виробів різної кількості без будь-якої модифікації;
- 3) пристосовність – здатність системи до переналагодження на новий виріб шляхом впливу ззовні або самонастроювання;
- 4) адаптивність – здатність пристосовуватись до часових технологічних відхилень, зміни зовнішніх або внутрішніх факторів у певних межах без порушення власного функціонування або втрати якості продукції;
- 5) мобільність – здатність до переналагодження технологічного процесу;
- 6) автономність керування – здатність працювати за безлюдною технологією.

У даний час запропоновано виділяти такі види гнучкості: конструктивна, технологічна, організаційна, номенклатурна, інструментальна, операційна, машинна, гнучкість за продукцією, гнучкість за обсягом, гнучкість процесу, стратегічна, тактична, оперативна [17].

Проте серед усіх показників основним критерієм гнучкості є ступінь гнучкості виробничої системи. E. Eraslan і M. Kurt розглядають гнучкість як

показник ефективності роботи виробничої системи [18]. Є. С. Пуховський запропонував математичну залежність для визначення ступеня гнучкості, виділяючи коефіцієнти універсальності та часової гнучкості [19]. С. Г. Бондаренко розглядає гнучкість як інтегральний показник, який залежить від обсягу партії деталей, часу обробки деталі та часу переналагодження [20].

Проаналізувавши усі поняття гнучкості, виділено види та підвиди гнучкості (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Поняття та характеристика видів гнучкості

Види гнучкості	Визначення та характеристика	Підвиди гнучкості
Конструктивна	характеризує можливості поетапного (модульного) створення системи, з подальшим нарощуванням, а також можливістю об'єднання декількох систем в єдиний комплекс	інструментальна операційна машинна
Номенклатурна	відображає здатність виробничої системи до швидкого й економічного переходу на виробництво виробів нового найменування	- гнучкість за продукцією
Технологічна	відображає здатність системи використовувати різні варіанти технологічного процесу для компенсації всіляких відхилень від запланованого графіка виробництва	гнучкість за обсягом гнучкість процесу
Організаційна	здатність правильно розподіляти пріоритети виготовлення номенклатури виробів, що виготовляються на підприємстві, з найменшими витратами	стратегічна тактична оперативна

Тобто інакше кажучи для реалізації гнучкості на більш високому рівні потрібно її спочатку реалізувати на більш низькому рівні, якщо такий присутній. Всі компоненти на схемі фактично не є незалежними, тобто вони взаємозв'язані і підвищення показників одного виду гнучкості сприятиме підвищенню або

вимагатиме підвищення показників інших видів гнучкості, що підтверджується твердженням: найважливішим чинником технологічної гнучкості є модульний принцип конструювання технічних засобів та стандартизація оснащення [20]. Найбільш складним, з точки зору автоматизації, є організація машинної й організаційної гнучкості, тобто фактично переналагоджуваність і універсальність.

Відомо, що у великосерійному та масовому виробництві використовуються верстати з високим ступенем автоматизації, але їх ступінь гнучкості дорівнює нулю. В одиничному та дрібносерійному виробництві, що на даний час превалює у машинобудуванні, підвищення ступеня автоматизації досягається за рахунок використання обробних центрів із ЧПК, що вбудовуються в автоматизовані комплекси, завдяки високим показникам ступеня гнучкості та продуктивності. Групування верстатів із ЧПК у автоматизовані комплекси дозволяє подолати основний недолік автоматичних ліній, а саме незмінність продукції, яку вони виготовляють. Жорсткість сучасних верстатів із ЧПК майже відповідає жорсткості верстатів-автоматів за рахунок використання композиційних матеріалів та відповідних інженерних розрахунків на стадії проектування з виявлення та удосконалення «слабких місць» конструкції. Також виключення таких елементів як коробка швидкостей, за рахунок використання мотор-шпинделів, підвищує динамічну жорсткість верстатів.

Поняття точності обробки та продуктивності, як і поняття гнучкості та продуктивності до появи обробних центрів із ЧПК були взаємопротилежні (рис. 1.2), тобто покращення однієї характеристики неодмінно призводило до погіршення іншої. Така ж тенденція існує й у галузі проектування ВП, де актуальним є дослідження та виявлення раціональної сфери застосування ВП для певних виробничих умов із економічної точки зору.

Для кількісної оцінки ступеня гнучкості технічних систем використовують інтегральний показник гнучкості [20]:

$$G_{ij} = \frac{t_{pj}}{t_{pj} + t_{ij}} \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (1.1)$$

де G_{ij} – ступінь гнучкості;

t_{pj} – тривалість циклу обробки однієї деталі j –го найменування;

t_{ij} – час переналагодження системи при переході з деталей i -го до деталей j –го найменування;

n – кількість найменувань деталей, що виготовляються гнучкою виробничою системою.

Як видно з виразу, коефіцієнт гнучкості може змінюватися в межах від «0» до «1». Чим вище коефіцієнт гнучкості, тим вище рівень гнучкості технологічного обладнання.

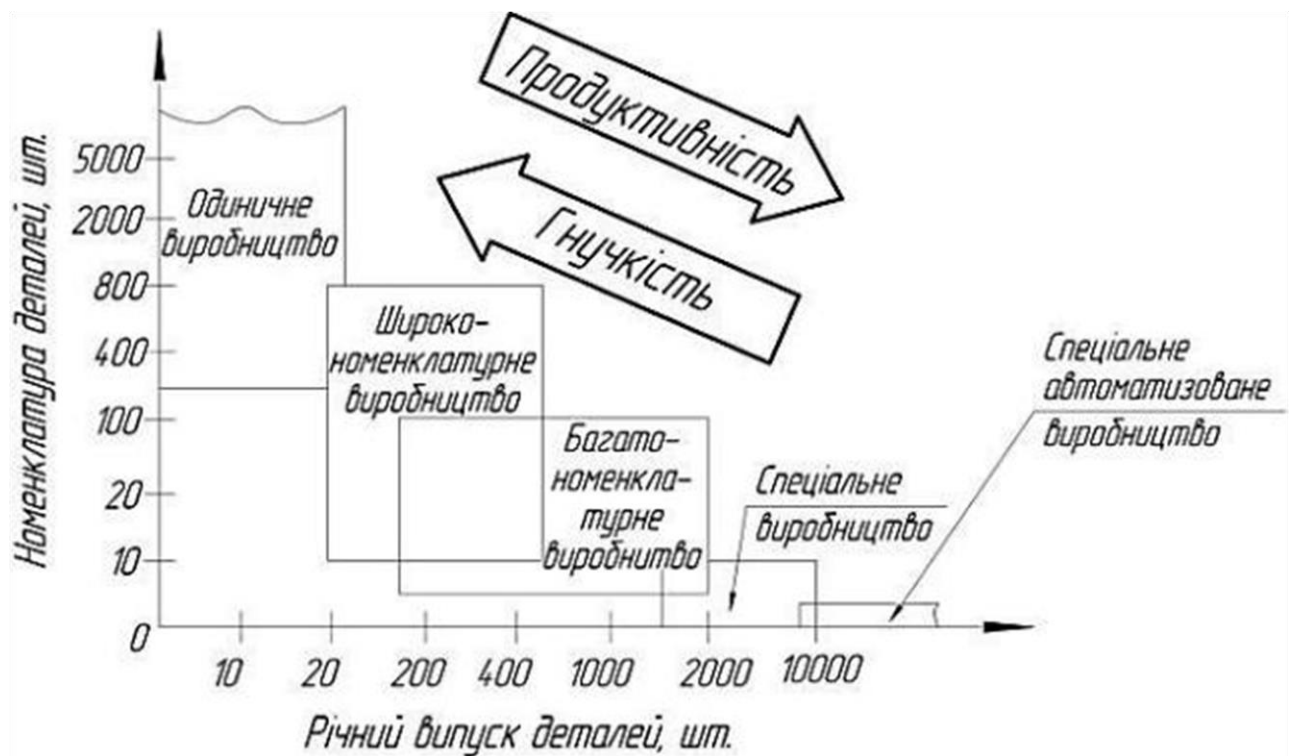


Рисунок 1.2 – Графічне представлення протиріччя між гнучкістю та продуктивністю

Різні спеціалісти у сфері гнучкості пропонують різні межі кількісної оцінки гнучкості та різну точність градації за величиною коефіцієнту гнучкості.

Так, наприклад Є. С. Пуховський у [19] вказує на те, що для порівняльного аналізу і оптимізації технічної системи необхідно мати можливість оцінювати ступінь гнучкості системи за допомогою інтегрального показника, який повинен

відображати функціонально-технічні можливості системи і не містити в собі економічних показників.

Як показник гнучкості прийнята величина G , що монотонно змінюється від 0 до 1. Ступінь гнучкості визначається числом різних функціональних станів n , які технічна система може дискретно приймати в межах своїх технічних можливостей, і часом переходу τ_{ij} з одного функціонального стану i в другий j . Тоді в якості першої складової показника ступеня гнучкості приймають коефіцієнт універсальності

$$g_1 = (1 - 1/n). \quad (1.2)$$

Цей вираз наближається до одиниці при $n \rightarrow \infty$ і обертається в нуль при $n = 1$, тобто універсальність в даному випадку буде найбільшою, а технічна система найбільш гнучкою.

Час T переходу від одного стану технічної системи до іншого визначається як сума часів кожного переходу:

$$T = \sum_{j=1}^n \cdot \sum_{i=1}^n \tau_{ij} \quad (1.3)$$

Другу складову показника гнучкості, а саме коефіцієнт часової гнучкості, можна визначити як відношення суми часів всіх переходів технічної системи до планового періоду часу $T_{пл}$, прийнятому за базовий при атестації та порівняльній оцінці технічної системи. Як $T_{пл}$ може бути прийнятий, наприклад, дійсний фонд часу технічної системи за певний період часу:

$$g_2 = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^n \cdot \sum_{i=1}^n \tau_{ij}}{T_{пл}} \right) \quad (1.4)$$

при

$$\sum_{j=1}^n \cdot \sum_{i=1}^n \tau_{ij} \leq T_{nl}$$

Цей вираз наближається до одиниці зі зменшенням сумарного часу переходів технічної системи і обертається в нуль з наближенням сумарного часу переходів з одного стану в інший до T_{nl} .

Інтегральний показник ступеня гнучкості G [19] технічної системи визначають:

$$G = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^n \cdot \sum_{i=1}^n \tau_{ij}}{T_{nl}} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{n} \right). \quad (1.5)$$

Оцінка гнучкості виробничих систем необхідна при визначенні їх економічної ефективності та доцільності застосування технічних систем в різних виробничих умовах [19].

З точки зору А. В. Проскурякова існують пряма і непряма оцінки ступеня гнучкості. При цьому пряма становить безпосередню оцінку властивостей виробничої системи, що забезпечують її гнучкість, а непряма – оцінку наслідків прояву властивості гнучкості, і зокрема, оцінку економічних результатів роботи систем з різною гнучкістю. Ступінь гнучкості виробничої системи, визначають два компоненти: число різних функціональних станів, система може дискретно приймати свої технічні можливості (n) і переходи з одного функціонального стану в інший – t , що здійснюють різноспрямований вплив на гнучкість системи з ростом n гнучкість підвищується, а із збільшенням t – знижується. На основі цієї концепції А. В. Проскуряковим пропонується визначати інтегральний показник гнучкості виробництва як:

$$K_e = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^n \cdot \sum_{i=1}^n t_{ij}}{Fe} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{n} \right) \quad (1.6)$$

де n – число функціональних станів виробничої системи;

t_{ij} – час переналагодження системи при переході з одного стану в інший;

Fe – ефективний фонд часу роботи системи. Узагальнюючий показник гнучкості Γ можна розрахувати за формулою

$$\Gamma = \frac{I_p}{I_3} \quad (1.7)$$

де I_p , I_3 - індекси зміни, відповідно, різноманітності і витрат Якщо $\Gamma=1$, то виробнича система є гнучкою.

С. Г. Бондаренко [17] пропонує оцінювати гнучкість в наступних діапазонах:

- $G_{\text{вн}}=1$ – технічна система повністю гнучка;
- $0,25 \leq G_{\text{вн}} < 1$ – технічна система високої гнучкості;
- $0,025 \leq G_{\text{вн}} < 0,25$ – малогнучка технічна система;
- $G_{\text{вн}} < 0,025$ – технічна система не має гнучкості.

Знання числових характеристик гнучкості виробничої системи дозволяє більш обґрунтовано визначити і передбачити при проектуванні системи необхідний рівень гнучкості виробництва з урахуванням техніко-економічних вимог до нього та існуючих обмежень.

Якісна гнучкість забезпечується за рахунок наявності універсального обслуговуючого персоналу і гнучкого виробництва. Зв'язок кількісної та якісної складових гнучкості представлений на рис. 1.3.

Схема, дозволяє говорити про те, що на підвищення виробничої потужності впливають як кількісне підвищення гнучкості за рахунок збільшення резерву обладнання та робочої сили, що є вже давно застарілим підходом, так і

підвищення рівня гнучкості в контексті якості. Підвищення якісного показника гнучкості може відбуватися за рахунок «універсалізації» обслуговуючого персоналу, тобто один робітник може працювати на будь-якому з декількох різних груп верстатів залежно від потреби в конкретний момент. Наявність гнучких автоматизованих систем верстатів із ЧПК передбачає, що вони здатні виконувати більше операцій ніж спеціальні та навіть універсальні верстати, за рахунок нових технологічних можливостей, що суттєво збільшуються з кожним роком. Цей шлях якісного підвищення гнучкості різко протилежний кількісному збільшенню резерву обладнання, що більшість часу простоює, займаючи виробничі площі та потребує додаткового обслуговування.



Рисунок 1.3 – Зв'язок кількісної та якісної складових гнучкості

Якісно гнучкість обладнання і виробництва в цілому може бути визначена за допомогою різних критеріїв:

- за ступенем полівалентності обладнання;
- часом переходу;
- сегментацією устаткування;
- наявністю запасних частин обладнання;
- ступенем різнопрофільності персоналу.

Ступінь полівалентності обладнання передбачає, що за типом обладнання можна сказати, призначене воно для виконання однієї задачі, або ж програмується на рішення безлічі завдань. При цьому чим вище ступінь полівалентності машини, тим прогресивнішою вона є.

Час переходу є критерієм полівалентності машин та припускає, що на одній машині можна швидко переходити від однієї операції до іншої, і що час переходу повинен прямувати до мінімуму. Оптимальним варіантом переналагодження при цьому є час натискання лише однієї кнопки.

Сегментація устаткування також становить важливий засіб гнучкості устаткування, тобто замість того, щоб мати одне гнучке обладнання, яке виробляє кілька видів продукції, краще мати декілька виробничих ліній, відповідних кожному виду продукції. При цьому весь процес стане менш дорогим і більш надійним, а його гнучкість підвищиться, тобто обладнання буде краще підходити до обсягів партій, що замовляються для кожного товару. Крім того, якщо відбулася переорієнтація на випуск нової продукції, то діюча лінія може бути зупинена, а персонал перейде на інший вид діяльності. Проте, якщо в певний момент на ринку виникає попит, то можна буде організувати виробництво різної продукції одночасно.

Наявність резервного устаткування відіграє важливу роль в гнучкості обладнання у разі несподіваного термінового замовлення або поломки однієї з ліній. Для того щоб обладнання резервної лінії було не надто дорогим, можна припустити, що це обладнання, повністю зношене, і не займає багато місця. Таким чином, наявність такого недовикористаного обладнання не являє собою в даному випадку свідоцтво нездатності підприємства повністю використовувати свої виробничі можливості, а є доказом його можливості забезпечити більш високу гнучкість виробництва при мінімальних витратах на переорієнтування на випуск нової продукції.

Ступінь різнопрофільності персоналу передбачає можливість рівнозначної заміни будь-якого працівника без втрати часу на його перекваліфікацію. Це також стосується виробничих ліній та обладнання.

1.3 Точність модульного технологічного оснащення

ВП, як складова ланка в замкненому ланцюзі послідовно пов'язаних елементів технологічної системи, своїми зв'язками – параметрами (геометричними, кінематичними, силовими) впливає на формування результату процесу обробки, передовсім точності обробки.

Під точністю обробки розуміють ступінь відповідності номінального розміру, формі та взаємного розташування, а також шорсткості конкретних поверхонь їх реальним значенням.

Проте у більшості випадків акцент робиться саме на розмірній точності, у той час як точності взаємного розташування приділяється недостатньо уваги, хоча вона також впливає на процес складання та роботи виробу. Точність взаємного розташування оброблюваних поверхонь залежить не лише від точності верстата а і від положення деталі відносно різального інструмента та елементів верстата, що забезпечується ВП.

При визначенні похибок установлення необхідно враховувати пружні деформації та знос елементів ВП, а також їх температуру, точність базування та похибки настроювання. Більшість факторів, що впливають на точність розмірів є несуттєвими для забезпечення точності координуючого розміру і навпаки. Одним із факторів, що впливає на точність забезпечення координуючого розміру є точність ВП.

Під точністю ВП розуміють його здатність надавати заготовці визначене положення та зберігати це положення під час обробки.

Під похибкою положення заготовки, тобто похибкою ВП $\varepsilon_{\text{ПР}}$ [21] мають на увазі сумарну похибку положення заготовки. Існує також істотна відмінність від розрахунку похибки ВП та похибки установлення. Похибка установлення розглядається як частина допуску на розмір, а похибка ВП у більшості випадків впливає на відносне положення поверхонь, тобто частину допуску координуючого розміру. У загальному випадку справедливим є розгляд точності ВП як частини допуску, однак для кожної схеми складові похибки ВП можуть

змінюватись. Похибка установлення є характеристикою точності процесу. Її розглядають як фактор, що визначає положення заготовки виходячи зі схеми базування та закріплення. При цьому похибка ВП – це характеристика певної конструкції ВП, що є сумарним фактором який визначає положення заготовки виходячи зі схеми ВП та його похибок за умови забезпечення координуючих розмірів обробки. Якщо похибка установлення розглядається до початку обробки, то похибку ВП слід розглядати у динаміці на протязі усього процесу обробки, оскільки динамічні характеристики ВП, такі як маса, демпфуючі властивості, умови тертя та інші можуть визначати вплив на динамічний стан технологічної системи, а головним чином на положення заготовки [21].

Точність ВП краще за все визначати через коефіцієнт запасу точності, що визначається як різниця між допуском на виготовлення та сумарною похибкою ВП. При цьому сумарна похибка обробки Δ_{Σ} у ВП визначається як сума статичної $\Delta_{\Sigma_{ст}}$ та динамічної $\Delta_{\Sigma_{дн}}$ похибок [22].

Статичні похибки, що впливають на точність розташування оброблюваної поверхні залежать від схеми установлення та конструкції ВП. Значення сумарної статичної похибки $\Delta_{\Sigma_{ст}}$ може бути визначено за формулою:

$$\Delta_{\Sigma_{ст}} = \sqrt{\varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_{з}^2 + \varepsilon_{зм}^2 + \varepsilon_n^2 + \varepsilon_{gn}^2 + \varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_i^2 + \varepsilon_{ei}^2}, \quad (1.8)$$

У цій формулі під коренем випадкові похибки, що поділяються на:

а) похибки складових частин технологічної системи, а саме:

ε_{δ} – похибка базування заготовки, тобто відхилення її вимірної бази відносно траєкторії оброблюваного інструменту;

ε_n – похибка пристрою, тобто похибка положення установчих елементів відносно елементів для встановлення (перевірки) ВП на верстаті або елементів для напрямлення різального інструменту;

ε_i – похибка різального інструменту, тобто похибка положення вершини або твірної інструменту відносно елемента для його встановлення на верстаті.

ε_g – похибка верстата, тобто похибка позиціонування та положення елементів верстата, що спричинюється відхиленням від паралельності (перпендикулярності) відносно переміщення елементів верстата для встановлення різального інструмента і ВП.

б) похибки установавлення компонентів системи, а саме:

ε_z – похибка закріплення заготовки, яка виникає від сили затиску;

ε_{zm} – похибка зміщення заготовки при її встановленні, яка виникає внаслідок наявності зазорів у з'єднаннях елементів ВП;

ε_{gn} – похибка ВП, яка визначається похибками верстата та положення елементів ВП для його встановлення або перевірки на верстаті;

ε_{gi} – похибка встановлення інструмента, яка визначається похибками верстата та положення елементів інструмента для його встановлення на верстаті [23].

Також, окрім вищевказаних, можуть виникати похибки, що викликані деформаціями заготовки або ВП при закріпленні та ін. Як правило, вони виражаються величинами другого порядку малості порівняно з вищезазначеними та у розрахунках не враховуються [22].

Динамічна точність ВП пов'язана з величинами похибок, що можуть з'явитися лише під час обробки, тобто у динаміці процесу. Тому з цієї точки зору саме динамічні похибки несуть основний вплив на точність обробки деталі у ВП.

До динамічних похибок ВП відносять:

ε_{zn} – похибки зношування базових елементів;

ε_t – похибки пристрою, що викликані температурними деформаціями;

ε_j – похибки, що обумовлені коливаннями технологічної системи, і які визначаються власними динамічними характеристиками.

Коли спрацювання установлювальних або напрямних елементів ВП ε_{zn} істотно впливає на підсумкову похибку, рекомендується призначити допуск на спрацювання цих елементів. Цей допуск має приблизно дорівнювати допуску оброблюваної поверхні. Запас на спрацювання ε_{zn} можна додати до похибки зміщення заготовки ε_{zm} , оскільки він збільшує саме цю похибку.

Значення ε_t визначається за формулами [21], а при спрощених розрахунках і при роботі з застосуванням мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) цю похибку можна не враховувати.

Значення ε_j – залежить від жорсткості технологічної системи. Ця похибка разом з похибкою налагодження Δ_H технологічної системи складає похибку метода обробки, тобто:

$$\varepsilon_j + \Delta_H = \Delta_M, \quad (1.9)$$

Отже сумарну похибку обробки в розгорнутому виді та з врахуванням зношування установчих елементів можна визначити за формулою:

$$\Delta_\Sigma = \sqrt{K_1 \varepsilon_\sigma^2 + \varepsilon_z^2 + (\varepsilon_{zm} + \varepsilon_{zn})^2 + \varepsilon_n^2 + \varepsilon_{gn}^2 + \varepsilon_\sigma^2 + \varepsilon_i^2 + \varepsilon_{di}^2} + K_2 \Delta_M, \quad (1.10)$$

де $K_1 = 0,8 - 0,85$ – коефіцієнт зменшення похибки базування (ε_σ) внаслідок того, що дійсні розміри установчої поверхні рідко дорівнюють граничним [25];

$K_2 = 0,6 - 0,8$ – коефіцієнт зменшення величини Δ_M , яким враховується змінювання табличних даних [25].

Важливим при проектуванні ВП є призначення розмірів і допусків положення основних елементів (для встановлення заготовки, встановлення або перевірки ВП на верстаті, напрямлення різальних інструментів тощо). При призначенні допусків слід керуватись розумінням економічності виготовлення та експлуатації ВП.

Основні рекомендації такі:

а) на розміри, які визначають похибку ВП, допуски призначають виходячи з технології його виготовлення, тобто керуючись економічною точністю обробки [24];

б) граничні відхилення розмірів установлювальних пальців, отворів кондукторних втулок та інших подібних їм елементів встановлюються, виходячи з умов забезпечення потрібного з'єднання з базовими отворами заготовки, свердлом, ін. [26];

в) у випадку, коли зношування установлювальних або напрямних елементів пристрою суттєво впливає на підсумкову похибку, рекомендується призначити допуск на зношування елементів. Величину допуску на зношування можна приймати такою, що дорівнює допуску оброблюваної поверхні;

г) усі інші розміри і допуски положення, які не впливають на похибку обробки, призначаються, виходячи з забезпечення нормальних умов для з'єднання заготовки з установлювальними елементами ВП, а ВП – з елементами верстата [26].

Проектуванням та дослідженням ВП займалися відомі вчені М.О. Ансеров, Б.М. Вардашкін, О.К. Горошкін, М.Д. Жолткевич, В.С. Карпусь, В.С. Корсаков, Ю.І. Кузнєцов, Ю.М. Кузнєцов, В.В. Микитянський, О.Я. Мовшович, а також J. N. Asante, O.J. Bakker, H. Deng, S.N. Melkote, S. S. Mohite, B. Li, Z. Liu, A. H. Nalbandh, S. Nelaturi, K. P. Padmahaban, Y. Rong, S. Selvakumar, M. Vasundara, M. Wang, K. Wang та ін.

Авторами статті [27] проведені дослідження в галузі проектування затискних елементів ВП та запропоновано використовувати принцип «форми затискних елементів» та величини сил закріплення, для визначення їх оптимального місця положення на заготовці та залежно від цього оптимальну величину сили. При цьому застосовувався алгоритм, аналогічний алгоритму за яким працюють елементи захвату у роботів. Результатом є розроблення програмних додатків, що дозволяють з'єднувати даний алгоритм із бібліотеками затискних елементів та проводити підбір або автоматизоване проектування затискних елементів з параметрами під конкретну деталь.

Автором статті [28] запропоновано скінченноелементу модель, яка показує взаємозв'язок контактної пружності з розподілом тиску в місці контакту в системі «ВП – заготовка» та дозволяє передбачити нормальні і тангенціальні контактні сили, а також розподіл тиску на кожному елементі системи «ВП – заготовка», а також не має обмежень на типи матеріалів, які можуть бути проаналізовані.

Z. Liu et. al. [29] побудували багатокритеріальний генетичний алгоритм, що заснований на методах оптимізації та об'єднує у собі геометричну модель

системи «ВП – заготовка» та модель контактної пружності та розрахунку розподілу тиску, враховуючи тертя в системі «ВП – заготовка», який дозволяє прискорити розрахунки та використовувати при цьому менші ресурси обчислювальних машин.

М. Vasundara et. al. [30] виконали дослідження максимальної величини пружної деформації заготовки при її закріпленні у різних ВП та виконувався підбір оптимальної конструкції ВП, де перевага надавалась тій конструкції, де деформації найменші за інших рівних умов.

В. Li та S. Melkote [31] представили метод багатократної (повторної) оптимізації визначення місця розташування затискних елементів ВП при розрахунках динамічних параметрів системи «ВП – заготовка». За рахунок використання оптимізаційних методів для 3D-моделей даних систем максимальна величина позиційного вектора похибки обробки була скорочена на 58%.

А. Nalbandh та С. Rajyaguru [32] запропонували використовувати «генетичний алгоритм» проектування та оптимізації конструкцій ВП, який змодельований на основі генетичного процесу оцінки, що використовується у біології та адаптований для машинобудування. Даний алгоритм базується на імовірнісних методах розрахунку та може бути використаний для знаходження глобального оптимуму рішення для багатьох типів оптимізаційних розрахунків, що в подальшому може бути інтегрована з САРР.

Робота [33] присвячена розробці способу моделювання та оптимізації ВП з використанням систем комп'ютерного проектування та моделювання (CAD/CAE) при нестационарних умовах, подібно до реального процесу різання, з метою виявлення оптимальної конструкції ВП.

Т. Papastathis [34] підкреслює важливість впровадження переналаджуваних ВП, але акцентує увагу на складності вибору оптимальної конструкції ВП для обробки тонкостінних деталей, що мають недостатню жорсткість. При цьому вирішується питання щодо регулювання величини сили закріплення залежно від величини сили різання.

Робота [35] присвячена використанню методу балансування миттєвих сил та законів тертя для визначення оптимальної величини сили закріплення для мінімізації деформацій заготовки. У роботі враховується ефект видалення матеріалу.

При вивченні систем «ВП – заготовка» основна увага приділяється аналізу контактної взаємодії між заготовкою та установлювальними та затискними елементами ВП. Аналізом системи «ВП – заготовка» займались N. M. Kumbhar, G. S. Patil, S. Hu, Y. Kang, Y. Rong, J. N. Asante, V. Cioata, I. Kiss, Y. Zheng, H. Asada, Y. C. Chou, J. F. Hurtado, S. Melkote, H. Deng, A. Al-Habaibeh, M. Vasundara та ін.

У роботі [36] досліджено тертя між елементами ВП та заготовкою, а також визначено деформації, які виникають у місцях їх контакту.

Автори статті [37] розробили комплексну модель системи «ВП – заготовка», де за допомогою комп'ютерних програм моделювання методом скінченних елементів ABAQUS і NASTRAN разом з програмами DMAP (Direct Matrix Application Program) і FORTRAN дослідили обробки блоку циліндрів із урахуванням закріплення у ВП на операції торцевого фрезерування. Розроблена методика моделювання використана для визначення впливу попереднього навантаження від сил закріплення та сил, що виникають у процесі обробки та вимушених коливань у системі «ВП – заготовка» на похибку оброблюваної плоскої поверхні.

Y. Kang [38] розробив методику для аналізу стійкості, яка реалізована у системі автоматизованого проектування ВП CAFixDV. Створена кінетична модель системи «ВП – заготовка» для формулювання задач стійкості положення заготовки та обчислення мінімального зусилля закріплення, необхідного для механічної обробки, а також досліджено вплив послідовності закріплення затискними елементами.

J. Asante [39] обчислив і дослідив вплив піддатливості ВП і режимів різання на стабільність положення заготовки, та використав його як основу для вибору відповідного ВП серед кількох альтернатив, застосовуючи аналітичний підхід.

V. Cioata і I. Kiss [40] розробили та представили спрощену аналітичну модель контактної деформації між затискними елементами ВП і заготовкою, і скінченноелементну модель для оцінки контактної деформації у місцях контакту затискних елементів ВП і заготовки.

Y. Zheng [41] розробив скінченноелементну модель визначення стійкості положення ВП із контактними елементами для розв'язання контактних задач при закріпленні заготовки у ВП. Крім того, розроблено методику аналізу інтенсивності сил закріплення та оптимізацію попереднього навантаження, що виникає за рахунок даних сил. Ці моделі оптимізації розглядають систему «ВП – заготовка» як систему контактуючих твердих тіл, за умови кулонівського тертя на стиках. Прогнозовані зовнішні сили від процесу механічної обробки подаються з виконанням статичного навантаження на моделі «ВП – заготовка».

H. Asada і A. Vu [42] створили матрицю Якобі для моделювання взаємодії системи «ВП – заготовка» у просторі. За допомогою цієї моделі, розроблено кінетичний аналіз для ВП, а саме аналіз детермінованого позиціонування, аналіз навантаження/розвантаження ВП, двостороннє та загальне обмеження.

Y. Rong та Y. Bai [43] провели ряд досліджень у галузі точності обробки та аналізу стійкості положення ВП. При аналізі точності базові поверхні заготовки моделювалися як середина між зміщеннями затискних елементів ВП і зміщенням заготовки. При аналізі стійкості положення ВП автори перетворювали просторову задачу (3D) у плоску задачу (2D), і вводили «діючий фактор», для врахування дії сили тертя.

Y. Chou та ін. [44] розробили методику визначення точок закріплення, а також необхідної сили закріплення для забезпечення стійкості положення заготовки у процесі обробки за рахунок застосування гвинтових механізмів закріплення у ВП.

Y. Wu та ін. [45] розробили методику для проведення контролю сили закріплення. Вони змоделювали контакти між заготовкою та затискними елементами ВП як лінійний та поверхневий контакти та вирішували дану задачу за допомогою методів нелінійного програмування.

А. Trappey та ін. [46] досліджували проблему тимчасовості стійкості положення ВП з урахуванням обмеження сили та напрямку її дії у системі «ВП – заготовка».

Проблема оптимізації сил закріплення також широко досліджується у галузі проектування ВП. Більшість попередніх робіт розглядає систему «ВП – заготовка», як квазістатичну та ігнорує динаміку системи. Е. DeMeter та ін. [47] розробили модель лінійного програмування для того, щоб оцінити мінімально необхідне затискне зусилля, яке запобігає ковзанню при контакті ВП із заготовкою під час механічної обробки. J. Kang та ін. [48] обчислили мінімальну силу закріплення за допомогою матриці контактної стабільності індексу чутливості, що є різновидом концепції «конуса тертя». С. Xiong та ін. [49] сформулювали проблему оптимізації сил закріплення, як задачу нелінійного програмування з обмеженнями, що побудована на концепції пасивного силового замикання. Деякі групи дослідників, такі як Y. Wang та ін. [50], Z. Тао та ін. [51], і J. Liu та D. Strong [52, 53] запропонували ідею динамічного закріплення, яка би враховувала змінний у часі характер механізованого закріплення. У їхніх роботах траєкторія переміщення інструменту була дискретизована, і точки, в котрих припускали появу максимальної сили обробки, були обрані та використані в квазістатичному аналізі.

J. Hurtado і S. Melkote [54] представили багатоцільову нелінійну модель оптимізації, яка може бути використана для того, щоб знайти мінімальне затискне зусилля для досягнення прилягання поверхні заготовки та у цілях досягнення необхідної жорсткості ВП. Ряд дослідників розробили модель для вирішення проблеми оптимізації компоновань ВП для досягнення зазначених допусків параметрів заготовки. М. Wang [55] використовував матрицю конфігурації для того, щоб описати взаємозв'язок між похибкою базування заготовки та відхиленнями при позиціонуванні затискних елементів.

У літературі про синтез ВП єдина робота, що враховує динаміку системи «затискний пристрій – заготовка», була опублікована науковцями В. Li і S. Melkote [56], які представили метод одночасної оптимізації компоновання ВП і

знаходження оптимальної величини сил закріплення для забезпечення умови мінімальної похибки базування заготовки. За допомогою методу Ньютона-Ейлера отримані рівняння руху, що регулюють динаміку системи «ВП – заготовка» під час механічної обробки. Тим не менш, фактор видалення матеріалу було проігноровано, та проблема стабільності закріплення не була розглянута.

Н. Deng [57] на відміну від попередників, які розглядали систему «ВП – заготовка» як квазістатичну, розглянула вплив видалення оброблюваного матеріалу на поведінку та динаміку системи «ВП – заготовка» у процесі механічної обробки.

R. Brost та K. Goldberg [58] розглядали двовимірний синтез ВП, використовуючи для цього геометричний аналіз та аналіз типу закріплення ВП. У своїй роботі вони визначають місце розміщення затискних елементів.

Y. Wu та ін. [59] застосовують 2D алгоритм до циліндричних поверхонь та інших видів установлювальних елементів для проектування компоновки ВП. W. Hu і Y. Rong у дослідженні [60] аналізують доступність обробки інструментом, враховуючи розміщення елементів ВП. Перевірку можливості здійснення механічної обробки без контакту інструменту з установлювальними та затискними елементами ВП виконують за рахунок розширення двовимірного контуру компонентів ВП і представлення інструменту, який рухається як сегмент точки або лінії. J. Cornella і R. Suarez [61] виконують двовимірне конструювання ВП для заготовок, що не мають великої кількості кутів. Для забезпечення достатньої сили закріплення незалежно від точного контакту вибираються чотири контакти, як самостійні області з контуру об'єкту, що характеризуються типом взаємодії «без тертя».

T. Phoomborlab і D. Ceglarek [62] представили тривимірну конструкцію компоновки ВП для процесів складання. Функціональною вимогою до їх конструкції є стійкість до перекидання та детерміноване розташування заготовки. У роботі розглядався тривимірний простір для конструювання з високою нелінійністю між ключовими характеристиками керування та ключовими характеристиками продукції. Шляхом інтеграції вибірки генетичного алгоритму

була зроблена двоступенева оптимізація і, як наслідок, проектування компонування ВП.

L. Yun-Hui [63] розроблено простий і повний алгоритм для автоматизованого оптимального проектування ВП для тривимірних заготовок. Була розглянута локальна процедура оптимізації закріплення у поєднанні зі стратегією іншого курсу з розкладанням проблеми вибору точок фіксації на декілька невеликих з метою знаходження оптимальної точки фіксації.

M. Y. Wang [64] представив макет конструкції ВП для тривимірних заготовок, заснований на концепції оптимального планування експерименту. Розташування установлювальних елементів ВП було отримано послідовно, використовуючи алгоритм заміни з вибором найкращих елементів.

Y. Rong та ін. [65] представив алгоритм знаходження та оцінювання похибки базування шляхом аналізу чутливості функцій для схеми базування у призмах. M. Estrems та ін. [66] визначили зміну у фіксуєчому отворі всередині обертання заготовки при цьому заготовка була зорієнтована за допомогою двох призм, щоб визначити, як відбувається зміна величини розмірів залежно від точності ВП. J. Hou та A. Tgarreu [67] застосували призми як притискачі для стабільної та ефективної роботи при установленні непризматичних деталей типу циліндрів. Вони використовували проектну геометричну аргументацію, щоб визначити місцеположення призм. Вивчення процесів закріплення у системах ВП контактного типу, тобто контактної взаємодії між елементами ВП та заготовкою, досліджувані в роботах вчених, базуються на оцінці мінімальних деформацій та застосуванні підходу з використанням жорсткої конструкції ВП.

K. Afzeri та ін. [68] оптимізували конфігурацію затискного ВП контактного типу. Заготовка утримувалась за допомогою точкових контактів із певним розташуванням масиву затискачів під дією сил тертя на контактних поверхнях. Для оцінки мінімальних деформацій ВП застосована інтеграція вибірки генетичним алгоритмом, а для знаходження найкращого розташування заготовки – система PSO.

W. Cai [69] оптимізував макет точкового контакту зведенням до мінімуму варіантів покриття площі заготовки, представлений як деякий ключ процесу контакту в місцях характерних точок.

Підхід із використанням жорсткої конструкції ВП призначений для визначення місцезнаходження точок контакту в будь-який момент на площині заготовки кількісно. А. Al-Nabaibeh та ін. [70] представив точковий тип контакту в універсальній системі закріплення через експериментальне проектування та оцінку. Система закріплення розроблена для закріплення деталей складної форми в аерокосмічній промисловості. Проведене експериментальне дослідження шляхом порівняння запропонованої системи з системою окремих затискних елементів. Встановлено, що система точкового контакту може бути швидкопереналагоджена для обробки деталей складної форми.

J. Hurtado і N. Melkote [71] відносять систему масиву точкових контактів до типу гнучких ВП для механічної обробки. За допомогою розробленої моделі знайдені зазначений рівень контактного прилягання, а також необхідне значення жорсткості та стійкої рівноваги у системі «ВП – заготовка». Це досягнуто за рахунок знаходження мінімальної сили закріплення, оптимальної кількості та необхідного положення і розмірів точок контакту.

Як відомо, ВП повинні мати певний запас точності [21]. Проте, величина запасу точності не є регламентованою, так як для цього необхідно знати не тільки сумарну похибку устанавлення, але і інтенсивність зношування та термін експлуатації ВП, що як правило, не перевищує 5 років. Розрахунок похибки, пов'язаної з устанавленням деталі при зношуванні базових елементів ВП для будь-якого заданого розміру може бути представлено, як визначення найбільшої зміни цього розміру, тому що устанавлювальний елемент може зайняти різне положення відносно різального інструмента. При цьому визначення похибки зношування при відомих значеннях похибок устанавлювальних елементів зводиться до вирішення геометричної задачі. Зношування устанавлювальних елементів також залежить від показника їх відносного зношування, що залежить

від матеріалу деталей ВП, наявності зносостійких покриттів на їх поверхнях та інших засобів, що попереджують передчасне зношування та втрату точності.

ВП поділяють на ВП для виконання відповідальних операцій механічної обробки та на ВП від яких не залежить точність розмірів отримуваних деталей. Організація експлуатації ВП включає в себе планово-попереджувальний ремонт оснастки, у тому числі і ВП, що включає в себе міжремонтний ремонт, а також періодичний контроль точності ВП.

Міжремонтному обслуговуванню підлягають ВП, що періодично не перевіряються, а також паспортизовані ВП у період між перевірками.

Норми точності на ВП встановлюють виходячи з допусків на виконання найбільш точних розмірів деталей. При цьому норми точності не є нижньою межею точності ВП, при якій забезпечується виготовлення деталей, що відповідають вимогам креслення. ВП повинні забезпечувати певний запас точності, що гарантує попередження появи бракованих деталей у період між плановими контролюями.

Періодичність контролю ВП залежить від партії оброблюваних деталей, кількості установлень деталей у ВП, фактичної зносостійкості та максимально допустимого зношування установлювальних елементів та умов експлуатації ВП. Також періодичність перевірки ВП залежить від типу виробництва де вони використовуються, а саме у масовому та великосерійному виробництві ВП перевіряють 1–2 рази на місяць, а у одиничному та дрібносерійному 4–6 разів залежно від типу ВП [21].

Точність ВП перевіряють шляхом визначення [21]:

- відхилення від площинності їх робочих поверхонь;
- відхилення від паралельності робочих поверхонь відносно основи;
- відхилення від паралельності робочих поверхонь одна до одної;
- відхилення від паралельності поверхонь баз відносно осі центруючого отвору;
- відхилення від перпендикулярності осі направляючої колонки;

- відхилення від перпендикулярності осі центруючого отвору робочої площини;
- відхилення від перпендикулярності вертикальної площини до основи;
- відхилення від перпендикулярності робочої поверхні кутника до поверхні планшайби;
- відхилення від перпендикулярності осі отвору до площини;
- радіальне биття циліндричного або конічного отвору;
- радіальне биття зовнішньої циліндричної поверхні відносно осі обертання;
- торцеве биття контрольованої поверхні відносно осі обертання.

Шляхом аналізу схем контролю точності ВП методи перевірки точності ВП можуть бути умовно розділені на контактний та оптичний.

Контактний метод реалізується за допомогою контрольно-вимірювальних приладів, у яких вимірювальним механізмом є, як правило, індикатор годинникового типу або інший вимірювальний механізм, заснований на принципі передачі руху від контактної поверхні інструменту на стрілку.

Оптичний метод полягає у визначенні величини похибок ВП за допомогою оптичних вимірювальних приладів (мікроскопи, оптичні лінзи).

Також точність ВП може бути визначена непрямим методом, тобто шляхом обробки еталонної деталі на верстаті необхідної точності з рекомендованими паспортом перевірки ВП режимами обробки, та безпосереднім контролем обробленої деталі. За відповідністю розмірів якої, з певною долею ймовірності, можна стверджувати про те чи забезпечує ВП необхідну точність [21].

Огляд джерел інформації всіх вищезазначених напрямків показує наступні обмеження виконаних науково-дослідних робіт:

1. Обмеження попередніх робіт щодо дослідження пружної деформації заготовки:

- більшість досліджень використовували або тільки модель твердого тіла, або модель пружного контакту системи «ВП – заготовка», але ці дослідження не враховували пружну деформацію заготовки, що виникає під час механічної обробки;

– хоча метод скінченних елементів (МСЕ) найкраще підходить для прогнозування пружної деформації заготовки та сил реакції опор, він, як правило, використовується для визначення пружної деформації тільки в контактних точках системи «ВП – заготовка». Тим не менш, у деяких дослідженнях, МСЕ використовувався для передбачення пружної деформації заготовки при статичному аналізі. У більшості досліджень науковці використовували програмне забезпечення ANSYS, а деякі дослідники – розробили вбудований модуль для вирішення рівнянь, щоб передбачити пружну деформацію заготовки. Але ці методи можна використовувати тільки для двовимірної геометрії. У випадку складної тривимірної геометрії, яка враховує вплив динамічного режиму, це є трудомістким процесом, оскільки при формулюванні рівняння руху за МСЕ, і забезпечення взаємодії комерційного програмного забезпечення МСЕ з методами оптимізації, шляхом збільшення кількості розрахунків, необхідно запустити модуль для вирішення рівнянь МСЕ, що інколи є неможливим.

2. Обмеження попередніх робіт щодо проектування компонувань ВП:

– недостатньо уваги приділено при проектуванні оптимізації компонувань ВП з метою зменшення похибки розміру і форми, викликаних пружною деформацією заготовки.

– у кількох дослідженнях оптимізовано компонування ВП за критерієм мінімуму пружної деформації заготовки виключно в умовах статичного навантаження, але не було зроблено жодних досліджень, щоб визначити оптимальне компонування ВП у динамічних умовах;

– статичне тертя у точці контакту «заготовка – установлювальний елемент ВП» завжди присутнє, і його не можна ігнорувати. Більшість дослідників оптимізували компонування ВП за критерієм мінімуму деформації заготовки, але вони нехтували тертям у точках контакту елементів системи «ВП – заготовка».

3. Обмеження попередніх робіт щодо нетрадиційних алгоритмів, що використовуються для оптимізації компонування ВП;

– більшість дослідників оптимізували компонування ВП, використовуючи лише методи нелінійної оптимізації, які не дають глобального або майже

оптимального рішення. Ще один недолік полягає в тому, що, так як метод нелінійного програмування потребує деяке початкове компонування ВП, його рішення залежить від початкових можливих компонувань ВП;

– лише деякі дослідники використовували методи оптимізації компонувань ВП, що базуються на нетрадиційних алгоритмах (генетичному алгоритмі і алгоритмі колонії мурах), щоб звести до мінімуму похибки розміру і форми заготовки, але показники використання зазначених алгоритмів при оптимізації компонувань ВП не порівнювалися з іншими нетрадиційними методами;

– в останніх дослідженнях проблеми оптимізації компонувань ВП використовують або дискретний метод, або безперервний метод. Безперервний алгоритм оптимізації є кращим для умов, коли область рішень можливого розташування елементів ВП невелика. Швидкість збіжності цільової функції при методі безперервної оптимізації компонувань ВП є також низькою.

На підставі досліджень авторів встановлено, що наступні дослідні роботи з проектування та оптимізації компонувань ВП можуть залучити більше зацікавлення в майбутніх дослідженнях на наступні теми [72]:

– багатокритеріальна оптимізація компонувань ВП для механічної обробки та визначення послідовності закріплення заготовок складної форми з урахуванням динамічних умов процесу;

– багатокритеріальна оптимізація компонувань ВП для механічної обробки за критеріями мінімуму пружної деформації заготовки, похибки розташування заготовки, а також оптимізація сили закріплення;

– інтеграція дискретних і безперервних методів оптимізації;

– використання декількох відповідних еволюційних алгоритмів і зіставлення результатів їх показників;

– можливість інтеграції МСЕ із методами оптимізації поряд зі штучною нейронною мережею, або з програмою планування експериментів;

– розроблення надійних комп'ютерних інструментів для проектування компонувань ВП.

Також аналіз літературних джерел показав, що у даний час науковці займаються розрахунками та розробкою моделей процесів взаємодії у системі «ВП – заготовка», а також дослідженням точності механічної обробки при зміні параметрів ВП. Проте недостатньо уваги приділяється підвищенню гнучкості ВП та інтенсифікації технологічних процесів, що зараз з появою нових компонувань верстатів із розширеними можливостями, які дозволяють виконувати 5-ти координатну обробку, є актуальною задачею. Це дозволяє використати резерви для скорочення штучного часу обробки деталі за рахунок зменшення в ньому частки допоміжного часу, що при невеликих партіях та частій зміні номенклатури може бути вигідним з точки зору собівартості продукції.

1.4 Мета та задачі науково-дослідної роботи

Виконання літературного огляду, що базується на дослідженнях багатьох вчених у галузі впровадження гнучких ВП для багатокординатної обробки дозволило сформулювати мету науково-дослідної роботи – удосконалення обробки деталей типу важелів в умовах серійного виробництва шляхом систематизації об'єктів обробки за конструкторсько-технологічними ознаками й розроблення та впровадження гнучких верстатних пристроїв для багатокординатної обробки на верстатах із ЧПК.

Для виконання поставленої мети сформовані етапи дослідження, що виражені наступними задачами.

Проаналізувати деталі типу важелів, систематизувати їх за конструкторсько-технологічними особливостями та запропонувати альтернативний підхід до проектування ТП при обробці на багатокординатних верстатах.

Запропонувати та розробити конструкцію ВП, здатну забезпечити установлення деталей у певному діапазоні розмірів при забезпеченні необхідної точності та можливості багатокординатної обробки методами параметричної оптимізації.

Обґрунтувати функціональну залежність визначення точності обробки заготовок від ступеня гнучкості ВП.

За допомогою методів чисельного моделювання та експериментальних досліджень провести комплекс заходів із визначення точності обробки деталей у ВП запропонованої конструкції.

Розробити рекомендації щодо області ефективного використання запропонованого ВП із подальшим впровадженням результатів досліджень у виробництво.

1.5 Висновки

У даному розділі виконано аналіз та систематизацію науково-технічних джерел інформації у галузі обробки деталей складної форми, можливостей сучасного металорізального обладнання, інтенсифікації виробництва, тенденцій розвитку машинобудівної галузі, оптимізації конструкцій ВП та їх розрахунку методами чисельного моделювання. Проте встановлено, що проектування ВП з високим ступенем гнучкості обмежується через застосування застарілих підходів до розроблення ТП, а також неповного використання можливостей багатокоординатної обробки, що у останні роки набуває широкого застосування у зв'язку з розвитком нових технологій у верстатобудуванні. За рахунок інтенсифікації ТП, багатокоординатної обробки та застосування гнучких ВП можна скоротити штучний час обробки деталі за рахунок зменшення в ньому непродуктивного допоміжного часу, що при невеликих партіях та частій зміні номенклатури стає вигідним з точки зору собівартості продукції.

Розглянуто та систематизовано поняття гнучкості ВП, виявлено резерви підвищення гнучкості ВП, визначено основні ознаки та проаналізовано види гнучкості виробничих систем, що дозволить у наступних розділах встановити взаємозв'язок між ними та елементами технологічної системи та розробити класифікацію ВП за рівнями переналадження. У даному розділі також сформовані мета, задачі, об'єкт і предмет дослідження та побудована структурно-логічна схема дослідження.

2 ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ МОДУЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОСНАСТКИ НА ПРИКЛАДІ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

2.1 Класифікація типових поверхонь різального інструменту для закріплення змінних непереточуваних пластин

Процес проектування інструменту необхідно розуміти так. По-перше, це створення зовсім нової конструкції, яка здатна забезпечити формоутворення деталі відповідно до її креслення та розробленого технологічного процесу. По-друге, це може бути вибір готової конструкції для забезпечення якогось технологічного процесу. У тому і у іншому випадках необхідно визначити, яким чином інструмент закріплюється на верстаті або у допоміжному інструменті, як він буде забезпечувати якість деталі та наскільки він сприятливий до експлуатації. Тобто необхідно знати складові різального інструменту та їх призначення.

Будь-який різальний інструмент складається із робочої та приєднувальної частин [74 – 76, 90] (рис. 2.1).

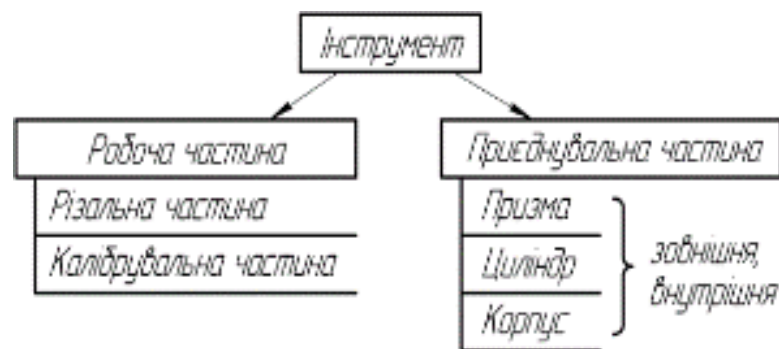


Рисунок 2.1 – Класифікація частин різального інструменту

Робоча частина металорізального інструменту складається із одного або декількох різальних зубів. Зуб інструменту (лезо) - це клиноподібне тіло, обмежене передньою і задньою поверхнями. Поверхня, по якій сходить стружка - передня поверхня, а поверхня, звернена до обробленої частини

заготовки, - задня. Лінія перетину передньої і задньої поверхонь - різальна кромка.

Форма і розміри зубів повинні забезпечувати виготовлення заданої поверхні деталі, працездатність і високу продуктивність інструменту. Положення поверхонь, які обмежують геометричне тіло зуба, визначається деякими кутами, які називаються геометрією інструменту (γ , α , β , φ , λ). Для визначення цих кутів (геометрії) використовуються спеціальні системи координат: інструментальна, статична і кінематична. Ці системи створюються перетином трьох взаємно перпендикулярних площин: основної - P_v , різання - P_n і головної січної - P_r .

У свою чергу, робоча частина має різальну і калібрувальну частини.

Різальна частина призначена для зрізування основної маси матеріалу із заготовки.

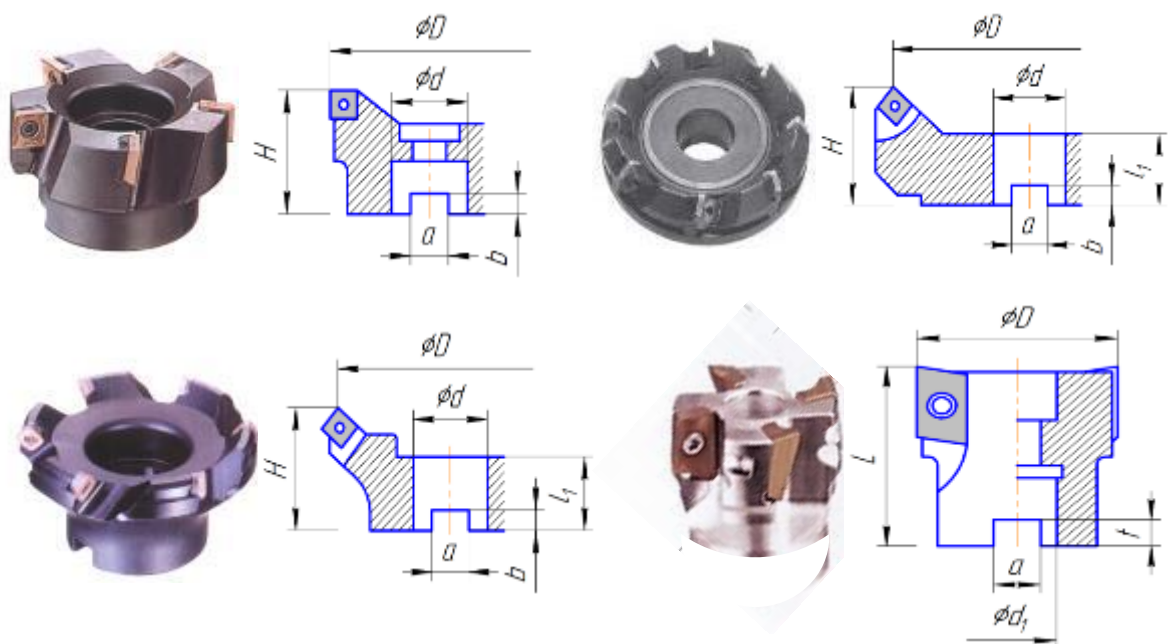


Рисунок 2.2 – Основні варіанти розміщення різальних пластин

Калібрувальна частина інструментів призначена для остаточного формування обробленої поверхні. Калібрувальна частина не є необхідною частиною усіх інструментів. У циліндричних фрез, фасонних різців різальна і

калібрувальна частини - одне ціле. У свердел, зенкерів, мітчиків, плашок калібрувальна частина чітко вирізняється.

При конструюванні різальних інструментів необхідно забезпечити безперешкодне відведення стружки із зони різання. У результаті нагромадження і затискання стружки збільшуються зусилля різання, погіршується шорсткість обробленої поверхні, ламається інструмент. Особливо це необхідно враховувати при конструюванні інструментів, де стружка відводиться по відповідних каналах або розміщується у них і видаляється після закінчення різання. Об'єм канавок для стружки повинен у 3-6 разів перевищувати об'єм стружки, яка там розміщується. В окремих випадках конструкція інструменту може передбачати примусове відведення стружки за допомогою струменя охолоджуючої рідини (при свердлінні глибоких отворів). Необхідно, щоб інструмент мав доцільні розміри, геометрію, сприятливі умови розміщення і відведення стружки, високу міцність і жорсткість, раціональний розподіл роботи різання між окремими різальними зубами і т. ін.

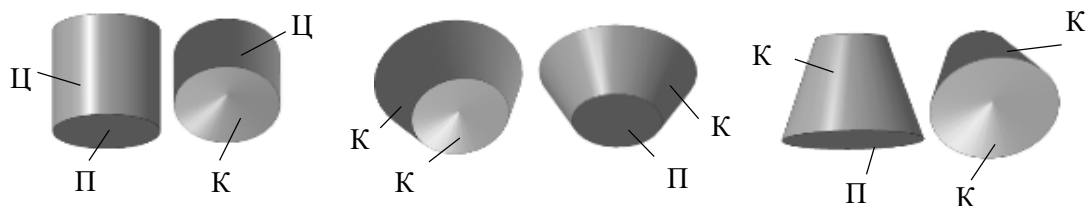


Рисунок 2.3 – Класифікація поверхонь

Для економії дорогого інструментального матеріалу у промисловості поширені різні складені інструменти. У таких інструментів леза виготовлені із інструментального матеріалу, а корпус - із конструкційної сталі (сталь 45, 40Х). Щоб уникнути впливу високих температур на інструментальний матеріал значного поширення набули інструменти, у яких зуби або інструментальний матеріал закріплюються механічними методами.

Переважні форми робочої частини показані на рис. 2. Тобто, вона обмежена вихідною інструментальною поверхнею, яка може складатися із таких двох елементарних поверхонь як циліндр (Ц), площина (П) та конус (К), (рис. 2.4). На цих поверхнях (бічній і торцевій поверхнях фрез) може бути як лінійний, так і точковий контакт з поверхнею деталі. Тому, залежно від призначення фрези, встановлюються кути φ_c та φ_c^1 , які визначають форму вихідної інструментальної поверхні.

Після того як встановлена форма робочої частини, необхідно вибрати пластину із інструментального матеріалу. Її різальні кромки повинні розміщуватися відповідно до необхідних значень кутів φ та $\varphi^1 = 180 - \varphi - \varepsilon$. Довжина різальних кромок повинна бути достатньою для реалізації параметрів режиму різання t та S .

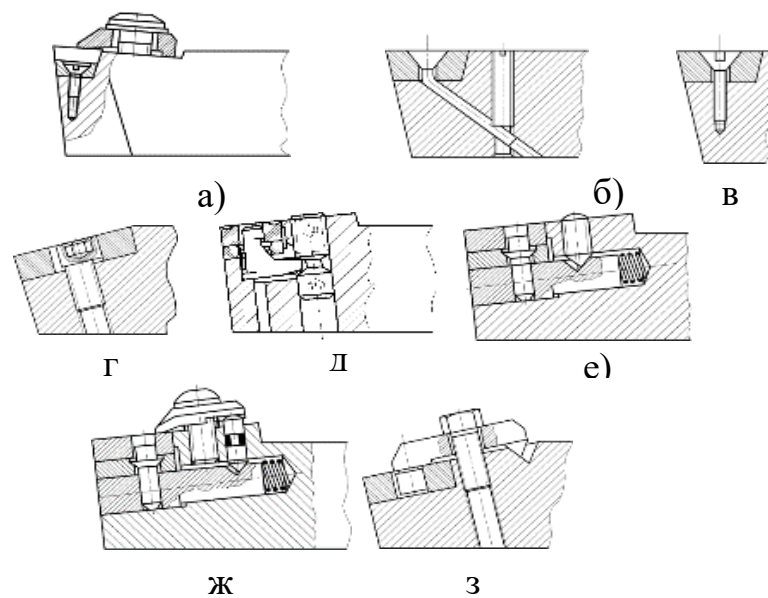


Рисунок 2.4 – Класифікація способів закріплення різальних пластин

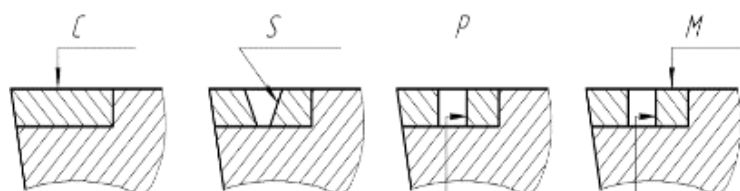


Рисунок 2.5 – Умовне позначення способу кріплення різальної пластини

Вибирають пластину з необхідним радіусом при вершині та з такими стружколамами на передній поверхні, які відповідають умовам процесу різання. Одночасно необхідно вирішити, який механізм буде використовуватися при закріпленні пластинки. Це впливає як на конструкцію пластини (з отвором чи без отвору, а якщо з отвором, то яка його форма), так і на конструктивні параметри порожнин у робочій частині, де цей механізм повинен розміщуватися.

При закріпленні пластинки, залежно від її конструкції та умов використання інструменту, сили, що притискають її до базових поверхонь, можуть спрямовуватись по-різному. Як впливає із поняття точності багатогранних непереточуваних пластин, базовими поверхнями у них є тільки зовнішні поверхні. Різноманітні отвори взагалі не пов'язані з їх точністю. Тому усі механізми для закріплення пластин повинні враховувати цю обставину – базами можуть бути тільки зовнішні поверхні пластин. Схеми, що відображають напрям дії сил кріплення, є схемами силового замикання (рис.2.5). Кожна із таких схем позначається відповідною літерою.

На практиці такі схеми реалізуються з допомогою спеціальних механізмів. Щоб створити силу за схемою *C* використовують прихоплювач (рис. 2.4 (а)). Проте одна і та сама схема може створюватися з допомогою різних механізмів. Силове замикання за схемою *S* створює механізм, де основною ланкою є зігнута тяга з голівкою (рис. 2.4 (б)), або гвинт (рис. 2.4 (в)). Схемі *P* відповідає ексцентрик (рис. 2.4 (г)), зігнутий важіль або «чобіток» (рис. 2.4 д) і тяга із штифтом (рис. 2.4 (е)). Дві сили одночасно створюються при загвинчуванні гвинта у механізмів, які показані на рис. 5 ж, з, що відповідає схемі *M*.

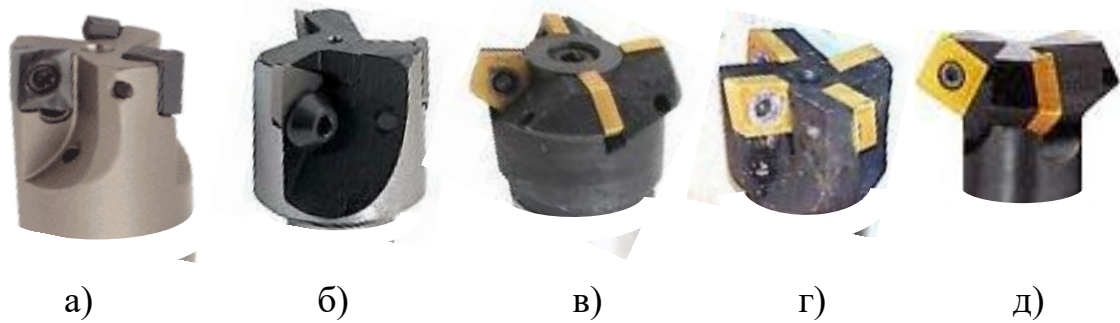


Рисунок 2.6 – Схеми реалізації силового замкнення

Через те що кінцеві фрези багатолезовий інструмент, механізм кріплення повинен бути компактним, спричиняти мінімальні зміни в міцності та жорсткості корпусу зуба. Таким вимогам найбільше відповідає схема силового замкнення S , для реалізації якої використовується простий (і як показала практика надійний) механізм – гвинт (рис. 2.6). Саме схема S дозволяє безперешкодний рух стружки по передній поверхні леза.

Кожна пластина має свою форму та геометрію в інструментальній системі координат (ІСК) [9]. Для оснащення різального інструмента БНП необхідно вибрати із каталога фірми-виробника таку пластину, геометрія якої максимально наближена до геометрії лез у статичній системі координат (ССК). Тому першим кроком при конструюванні складеного інструмента є розміщення ІСК відносно корпусу інструмента та орієнтація в ній вибраної БНП.

Після чого необхідно повернути БНП у фронтальній та профільній площинах на кути θ_1 і θ_2 для створення необхідних кутів у статичній системі координат (рис. 2.7). При цьому використовуються три системи координат: $x_c y_c z_c$ – статична (глобальна), нерухома система координат; $x_i y_i z_i$ – інструментальна система координат (ІСК); $x_n y_n z_n$ – перехідна рухома система координат. У системі $x_i y_i z_i$ задаються вихідні параметри БНП, а перехід із цієї системи через $x_n y_n z_n$ в систему $x_c y_c z_c$ дозволяє визначити положення БНП після повороту на такі кути θ_1 та θ_2 , коли забезпечується необхідна геометрія інструмента в статичній системі координат (ССК) з площинами P_{vc} , P_{nc} , P_{tc} .

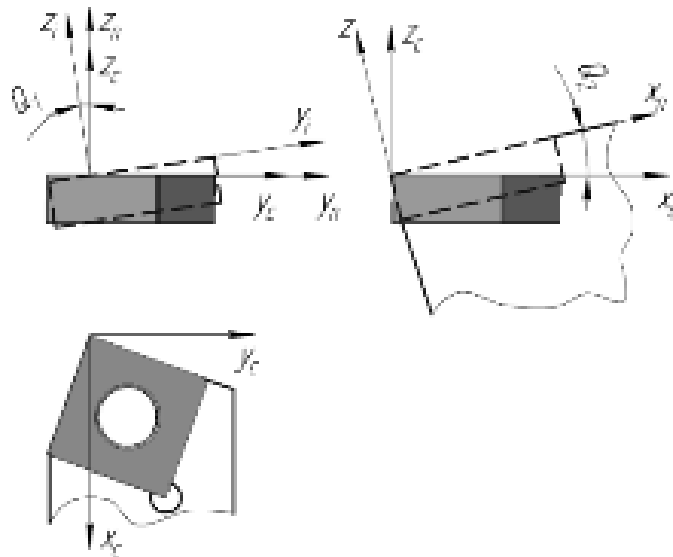


Рисунок 2.7 – Схема переходу від інструментальної до статичної системи координат

Формули переходу із інструментальної до статичної системи координат. Після повороту на кут θ_1 (див. рис. 2.7) обертається система $x_i y_i z_i$, а системи $x_n y_n z_n$ та $x_c y_c z_c$ нерухомі (до обертання усі системи збігаються) [4, 6].

Після повороту на кут θ_1 у фронтальній площині координати у перехідній системі такі [10]:

$$\begin{cases} x_n = x_i \\ y_n = y_i \cos \theta_1 - z_i \sin \theta_1 \\ z_n = z_i \cos \theta_1 + y_i \sin \theta_1. \end{cases} \quad (2.1)$$

Після повороту на кут θ_2 у профільній площині, перехід із системи $x_n y_n z_n$ у систему $x_c y_c z_c$ відображається рівняннями:

$$\begin{cases} x_c = x_n \cos \theta_2 - z_n \sin \theta_2 \\ y_c = y_n \\ z_c = z_n \cos \theta_2 + x_n \sin \theta_2. \end{cases} \quad (2.2)$$

Остаточно після обох поворотів координати точок БНП у статичній системі координат визначаються підстановкою (2.1) в (2.2)

$$\begin{cases} x_c = x_i \cos \theta_2 - \sin \theta_2 (z_i \cos \theta_1 + y_i \sin \theta_1) \\ y_c = y_i \cos \theta_1 - z_i \sin \theta_1 \\ z_c = \cos \theta_2 (z_i \cos \theta_1 + y_i \sin \theta_1) + x_i \sin \theta_2. \end{cases} \quad (2.3)$$

Ця система рівнянь дозволяє визначити координати точок після повороту на кути θ_1 та θ_2 БНП будь-якої форми: з прямолінійною чи криволінійною різальною кромкою, яка лежить на площині чи має просторову форму.

Визначення статичних кутів λ_c та φ_c . Проведемо в інструментальній системі координат (рис. 2.8) одиничний вектор \bar{a} , який виходить із деякої точки A різальної кромки і дотичний до різальної кромки [7, 8]. У площині P_{ni} кут між цим вектором і основною площиною це кут λ_i . Тоді проекція вектора \bar{a} на вісь z_i дорівнює $\bar{c} = \bar{a} \sin \lambda_i$, а проекція його на площину P_{vi} дорівнює $\bar{f} = \bar{a} \cos \lambda_i$. Вектор \bar{f} у площині P_{vi} проектується на осі x_i та y_i як $\bar{p} = \bar{f} \cos \lambda_i \sin \varphi_i$ та $-\bar{r} = \bar{f} \cos \lambda_i \cos \varphi_i$ відповідно (бо кут між ним і віссю y_i це кут φ_i). Тоді $\bar{f} + \bar{c} \sin \lambda_i = \bar{a}$.

Звідки $\bar{a} = \bar{p} \cos \lambda_i \sin \varphi_i + (-\bar{r} \cos \lambda_i \cos \varphi_i) + \bar{c} \sin \lambda_i$. Позначимо координати цього вектора в ІСК як $x_{1c} = \cos \lambda_i \sin \varphi_i$, $y_{1c} = -\cos \lambda_i \cos \varphi_i$, $z_{1c} = \sin \lambda_i$. Підставляємо координати вектора \bar{a} в систему (2.3) і отримуємо його координати у статичній системі координат (рис.2.9):

$$\begin{aligned} x_{1c} &= \cos \lambda_i \sin \varphi_i \cos \theta_1 - \sin \theta_2 (\sin \lambda_i \cos \theta_1 + \cos \lambda_i \cos \varphi_i \sin \theta_1) \\ y_{1c} &= \cos \lambda_i \cos \varphi_i \cos \theta_1 - \sin \lambda_i \sin \theta_1 \\ z_{1c} &= \cos \theta_2 (\sin \lambda_i \cos \theta_1 + \cos \lambda_i \cos \varphi_i \sin \theta_1) + \cos \lambda_i \sin \varphi_i \sin \theta_2 \end{aligned}$$

$$\bar{a}_c = \bar{i}x_{1c} + \bar{j}y_{1c} + \bar{k}z_{1c}.$$

$$\operatorname{tg} \lambda_c = \frac{z_{1c}}{\sqrt{(x_{1c})^2 + (y_{1c})^2}} \quad (2.4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_c = \frac{x_{1c}}{y_{1c}} \quad (2.5)$$

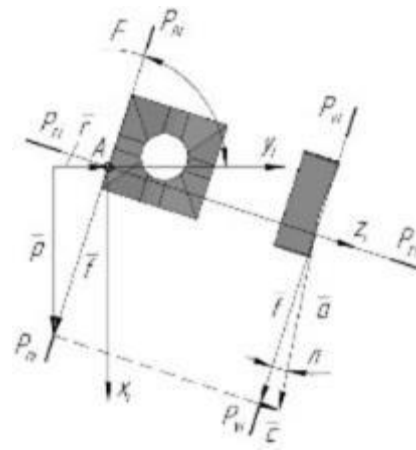


Рисунок 2.8 – Визначення кута повороту різальної пластини з прямолінійною різальною кромкою

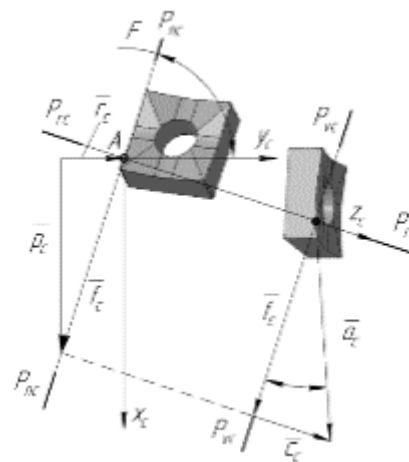


Рисунок 2.9 – Визначення кута повороту різальної пластини з криволінійною різальною кромкою

Для визначення заднього кута у статичній системі координат різця з БНП проведемо у ІСК вектор \bar{e} , одиничний вектор вздовж лінії перетину задньої поверхні та головної січної площини P_{ti} (рис. 2.10). На рисунку видно, що вектор $-\bar{e}=1$. Тоді $-\bar{q}=-\bar{e}\cos\alpha_i$, $\bar{e}=\bar{d}+(-\bar{q})$. На площині x_i, y_i вектор $\bar{d}=-\bar{e}\sin\alpha_i$ має проєкції

$$\bar{n} = \bar{e}\sin\alpha_i\cos\varphi_i = \bar{i}\sin\alpha_i\cos\varphi_i; \quad \bar{s} = -\bar{e}\sin\alpha_i\sin\varphi_i = -\bar{j}\sin\alpha_i\sin\varphi_i.$$

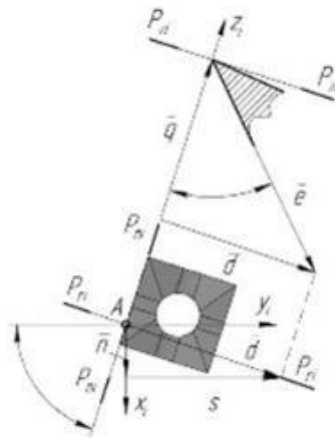


Рисунок 2.10 – Схема визначення заднього кута у статичній системі координат

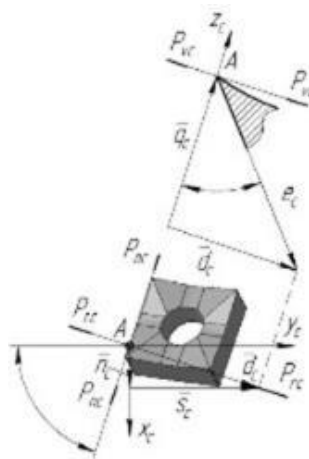


Рисунок 2.11 – Схема визначення заднього кута у інструментальній системі координат

Тому $\bar{d} = (-\bar{i} \sin \alpha_i \cos \varphi_i) + (-\bar{j} \sin \alpha_i \sin \varphi_i)$.

Отже $\bar{e} = -\bar{i} \sin \alpha_i \cos \varphi_i - \bar{j} \sin \alpha_i \sin \varphi_i + \bar{k} \cos \alpha_i$.

Позначимо координати вектора \bar{e} у інструментальній системі координат як x_2, y_2, z_2 :

$x_2 = -\sin \alpha_i \cos \varphi_i, y_2 = -\sin \alpha_i \sin \varphi_i, z_2 = \cos \alpha_i$, отже

$$\bar{e} = \bar{i}x_2 + \bar{j}y_2 + \bar{k}z_2. \quad (2.6)$$

У статичній системі координат (ССК) цей же вектор має інші координати (рис.2.11):

$$\bar{e}_c = \bar{i}x_{2c} + \bar{j}y_{2c} + \bar{k}z_{2c}.$$

Враховуючи систему (2.3) виконаємо перехід із ІСК у ССК

$$\begin{cases} x_{2c} = x_2 \cos \theta_2 - \sin \theta_2 (z_2 \cos \theta_1 + y_2 \sin \theta_1) \\ y_{2c} = y_2 \cos \theta_1 - z_2 \sin \theta_1 \\ z_{2c} = \cos \theta_2 (z_2 \cos \theta_1 + y_2 \sin \theta_1) + x_2 \sin \theta_2. \end{cases}$$

Задній кут у ССК, це кут між вектором \bar{e}_c , направленим вздовж лінії перетину задньої поверхні та головної січної площини у ССК і віссю z_c

Тоді

$$\operatorname{tg} \alpha_c = \frac{\sqrt{(x_{2c})^2 + (y_{2c})^2}}{z_{2c}}. \quad (2.7)$$

Для визначення переднього кута у ССК проведемо у ІСК одиничний вектор $-\bar{g}=1$, дотичний до передньої поверхні у даній точці різальної кромки (рис. 12). Тоді $-\bar{u} = -\bar{g} \sin \gamma_i$,

$\bar{h} = -\bar{g} \cos \gamma$, $\bar{g} = (-\bar{u}) + \bar{h}$. Проекції \bar{h} на осі x_i та y_i :
 $\bar{m} = -\bar{g} \cos \gamma_i \cos \varphi_i = -\bar{i} \cos \gamma_i \cos \varphi_i$, $\bar{w} = -\bar{j} \cos \gamma_i \sin \varphi_i = -\bar{j} \cos \gamma_i \sin \varphi_i$. Отже $\bar{h} = \bar{m} + \bar{w}$,
 тому $\bar{g} = (-\bar{i} \cos \gamma_i \cos \varphi_i) + (-\bar{j} \cos \gamma_i \sin \varphi_i) + \bar{k} \sin \gamma_i$.

Позначимо $x_3 = -\cos \gamma_i \cos \varphi_i$, $y_3 = -\cos \gamma_i \sin \varphi_i$, $z_3 = \sin \gamma_i$, тоді

$$\bar{g} = \bar{i}x_3 + \bar{j}y_3 + \bar{k}z_3.$$

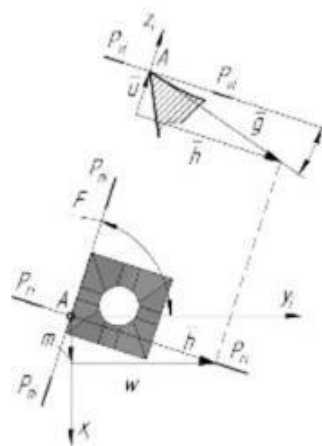


Рисунок 2.12 – Схема визначення переднього кута у статичній системі координат

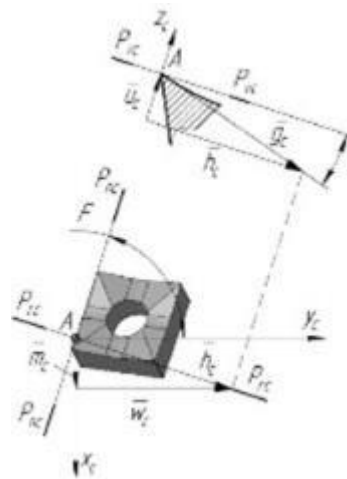


Рисунок 2.13 – Схема визначення переднього кута у інструментальній системі координат

У статичній системі координат (ССК) цей же вектор має інші координати (рис. 2.13):

$$\bar{g}_c = \bar{i}x_{3c} + \bar{j}y_{3c} + \bar{k}z_{3c}.$$

Враховуючи систему (2.3) виконаємо перехід із ІСК у ССК

$$\begin{cases} x_{3c} = x_3 \cos \theta_2 - \sin \theta_2 (z_3 \cos \theta_1 + y_3 \sin \theta_1) \\ y_{3c} = y_3 \cos \theta_1 - z_3 \sin \theta_1 \\ z_{3c} = \cos \theta_2 (z_3 \cos \theta_1 + y_3 \sin \theta_1) + x_3 \sin \theta_2. \end{cases}$$

Кут γ_c , це кут між вектором \bar{g}_c та площиною P_{vc} , тому він визначається наступним чином.

$$\operatorname{tg} \gamma_c = \frac{z_{3c}}{\sqrt{(x_{3c})^2 + (y_{3c})^2}}. \quad (2.8)$$

Приклад. Необхідно оснастити кінцеву фрезу БНП при $\varphi_c=70^\circ$, $\alpha_c \approx 8^\circ$. Вибираємо пластину з $\alpha_i=0^\circ$, $\varphi_i=70^\circ$, $\gamma_i=0^\circ$, $\lambda_i=0^\circ$.

Використовуючи залежність (2.7) визначаємо лінії рівня заднього кута залежно від кутів повороту θ_1 та θ_2 (рис. 2.14).

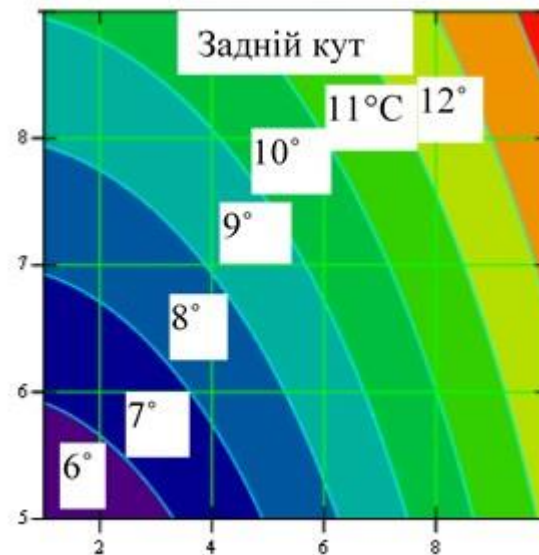


Рисунок 2.14 – Схема ліній рівня заднього кута

Призначивши $\theta_1=7^\circ$ та $\theta_2=5^\circ$, за формулами (2.4), (2.5), (2.7) (2.8) отримуємо:

$$\varphi_c=69,996^\circ, \lambda_c=7,09^\circ, \alpha_c=8,595^\circ, \gamma_c=-8,273^\circ.$$

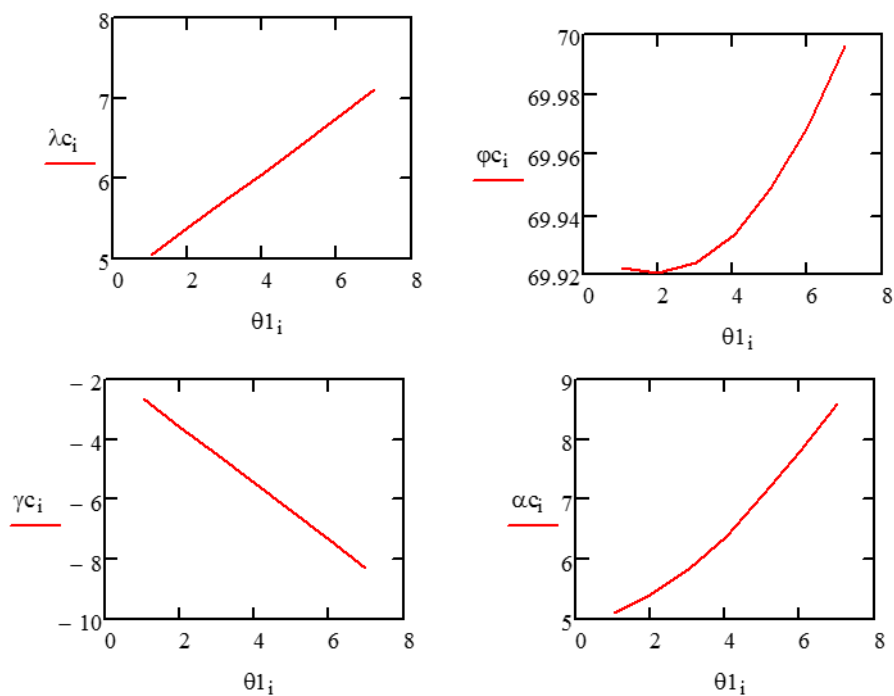


Рисунок 2.15 – Вплив кута повороту на значення статичних кутів

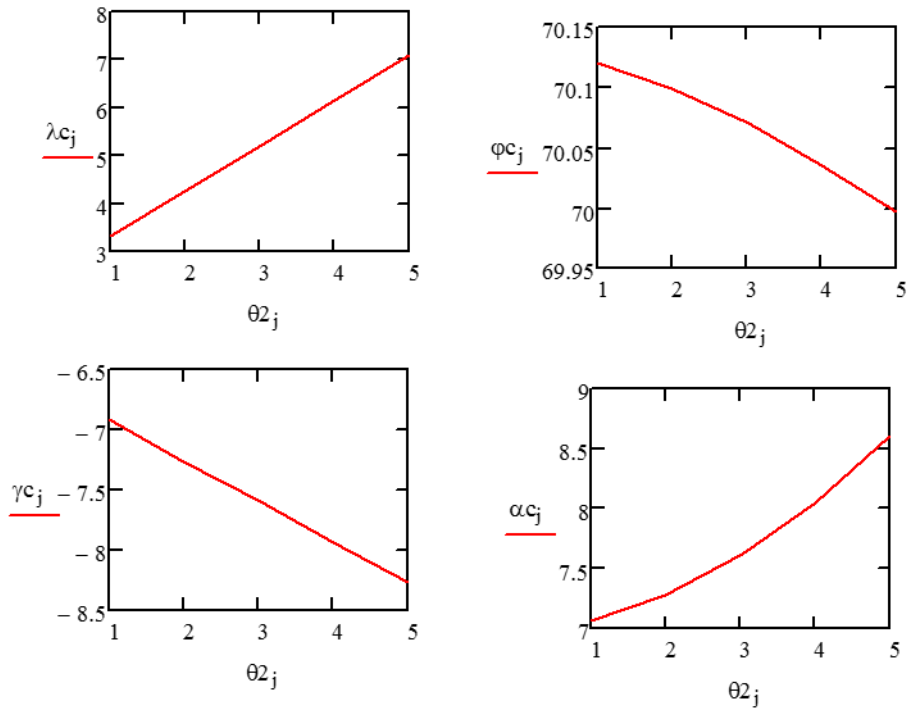


Рисунок 2.16 – Вплив кута повороту на значення статичних кутів

Вплив кожного з кутів повороту на остаточне значення статичних кутів при наявній геометрії вибраної БНП можна проаналізувати за формулами (2.4), (2.5), (2.7) (2.8) (рис. 2.15, 2.16). Для кінцевих та торцевих фрез переважно можна використовувати пластини форми *C*, *R*, *T*, *S*, *D*, *W* (рис. 2.17), стандартної геометрії з параметрами найближчими до статичної.

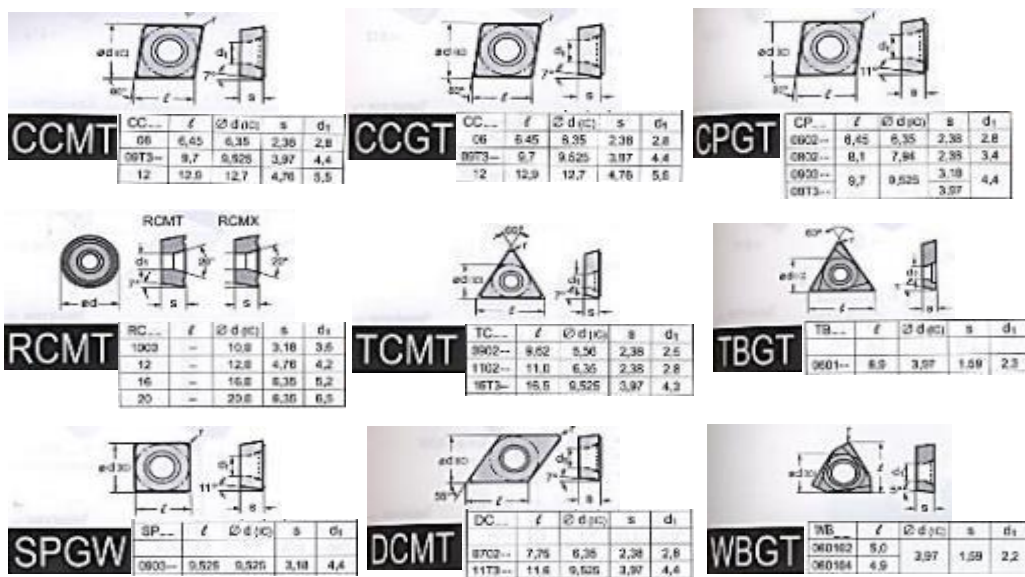


Рисунок 2.17 – Маркування форми різальних пластинок

2.2 База даних елементарних поверхонь різального інструменту

Багатогранні непереточвні пластини базуються у «гнізді» тільки по зовнішнім поверхням, відповідно до теорії базувння (рис. 2.18).

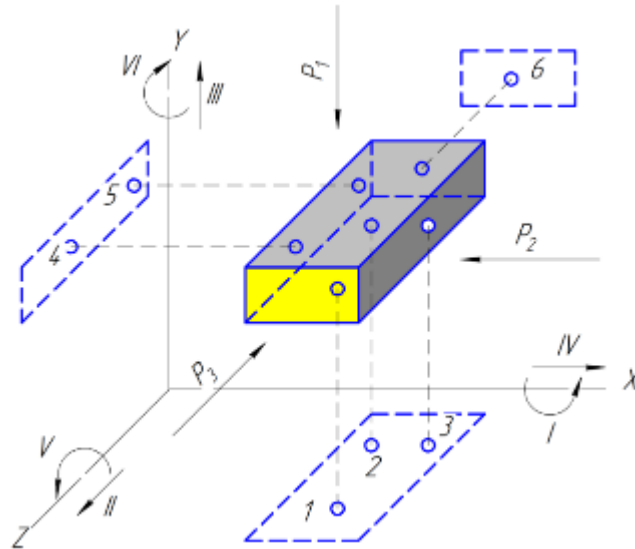


Рисунок 2.18 – Схема базування «гнізд» з урахуванням теорії базування

Точність багатогранної непереточуваної пластини забезпечує допустиме відхилення координат її робочої вершини після змінення положення через зношення попередньої. Точність, це величина допуску на відстань m від вершини до кола, дотичного до базових поверхонь (рис. 2.19). Дотримання умов базування, поряд з особливостям визначення точності БНП, дозволяють забезпечити надійність закріплення БНП та точність інструментального облаштування як у процесі роботи, так і після відновлення через зношення БНП.

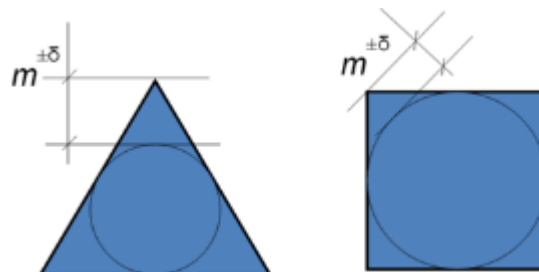


Рисунок 2.19 – Допуск на відстань m від вершини до кола

Отже, для забезпечення правильного та надійного базування, на корпусі інструмента повинні створюватися (відповідно до рис.2.18) три взаємно перпендикулярні площини A , B , C , які обмежують «гніздо», рис. 2.19.

Проте, бувають і винятки. Якщо немає суворих вимог до точного положення вершини БНП відносно корпусу інструмента, то для базування може використовуватися поверхня отвору, рис. 2.19.

Є конструкції, де безпідставно збільшують кількість базових поверхонь за рахунок утворення Т-подібного напрямного виступу, рис 2.20. І пояснюють це тим [76], що «використовуючи звичайні значення подачі, можна отримати кращу якість поверхні; зростає продуктивність; з'являється можливість отримати більш жорсткий допуск; скорочується допоміжний час».

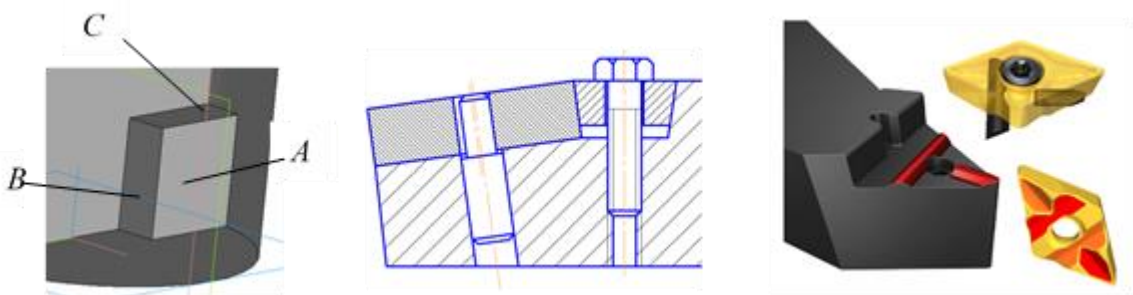


Рисунок 2.20 – Конструкція базових поверхонь

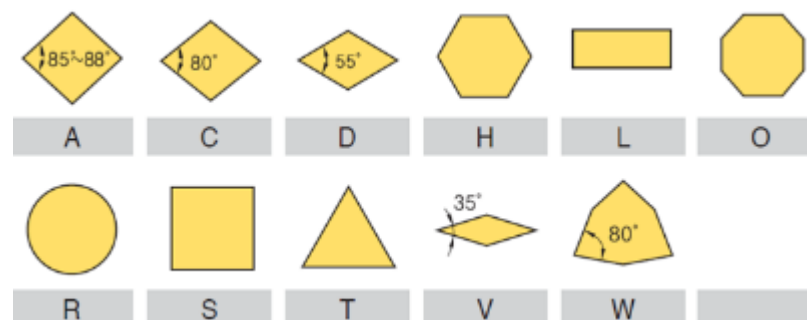


Рисунок 2.21 – Кодування різальних пластин

Відповідно до теорії базування багатогранна непереточувана пластина будь-якої форми (рис. 2.22) [2 - 11] повинна мати три зовнішні поверхні, за

якими обмежуються шість її рухів щодо корпусу (три поступальні та три обертальні).

Залежно від геометрії леза та конструкції інструмента пластина може мати наступні конструктивні характеристики:

- 1) задній кут дорівнює нулю, $\alpha=0$ (рис. 2.22 а, б, д, е);
- 2) задній кут відмінний від нуля, $\alpha\neq 0$ (рис. 2.22 в, г);
- 3) при $\alpha=0$ дві поверхні можуть використовуватися як передні (рис. 2.22 а, б);
- 4) при $\alpha\neq 0$, як передня, може бути використана одна поверхня (рис. 2.22 в, г);
- 5) тільки одна поверхня пластини може бути передньою при $\alpha=0$, якщо вона має специфічну топографію, таку що не дозволяє використати її для базування (рис. 2.22 д, 2.23), або має отвір з односторонньою фаскою (рис. 2.22 д, е);



Рисунок 2.22 – Конструктивні особливості різальних пластин

Форма «гнізда», а отже і технологія його виготовлення, визначаються, в першу чергу, геометрією та конструктивними особливостями БНП, а також технологічними прийомами утворення базуючих поверхонь.

Послідовність формування «гнізда» може бути наступною:

- 1) Фрезерувати стружкову канавку, тим самим задаючи положення передньої поверхні БНП.
- 2) Якщо використовується пластина, що відповідає п. 5, то необхідно створити базуючі поверхні кінцевою фрезою, передбачаючи перебіг на одній із вертикальних сторін для утворення виходу для абразивного інструмента під час їх шліфування (рис. 2.23 а).

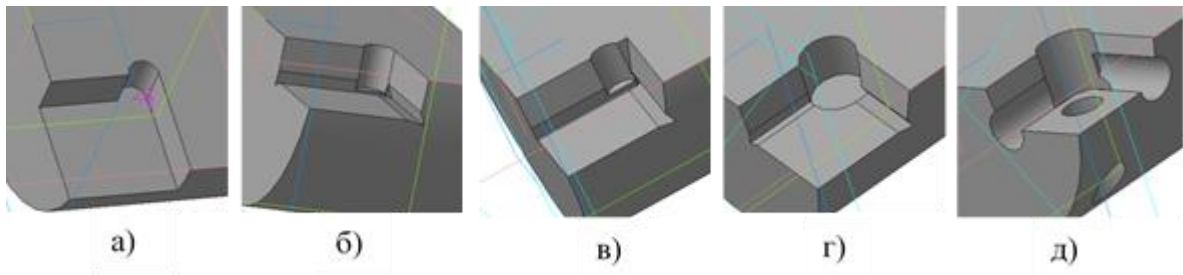


Рисунок 2.23 – Форма посадочних місць під змінні не переточувані пластини

3) Для відокремлення встановлювальної поверхні базування від напрямної і опорної (під час шліфування) розмежувати їх двокутовою фрезою (рис. 2.23 б).

4) Якщо $\alpha \neq 0$ (п. 5), то наступним кроком є фрезерування напрямної та опорної поверхонь під відповідними кутами. При цьому одна з поверхонь відхиляється і утворюється не естетичний уступ (рис. 2.23 в)). Щоб запобігти цьому, краще свердлом більшого діаметра створити попередньо отвір на лінії перетину напрямної та опорної поверхонь (рис. 2.23 г)).

5) Коли використовується БНП з $\alpha=0$, але з криволінійною різальною кромкою і значним позитивним переднім кутом (рис. 2.24), розмежування між базуючими поверхнями «гнізда» слід виконувати свердлом (рис. 2.23 д)). Це збільшує вільний простір між базуючими поверхнями, в якому розміщуються нерівності передньої поверхні БНП.

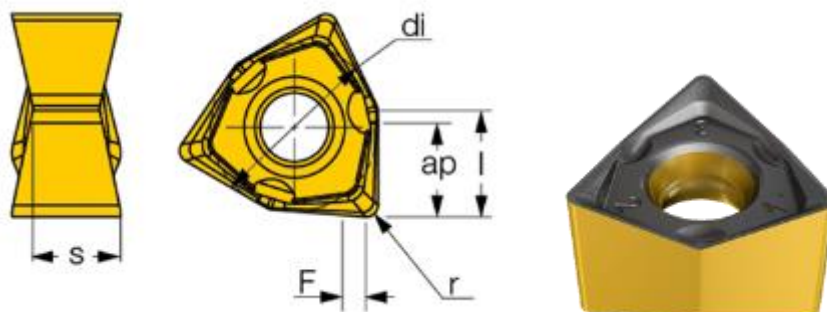


Рисунок 2.24 – Геометричні параметри різальної пластини

Таблиця 2.1 – Значення геометричних параметрів різальної пластини

Designation	l	a _p	d _i	S	r	F	f _z (min)	f _z (max)	a _p (min)	a _p (max)
H690 WNMU 0705-PNTR General use insert with 6 right-hand cutting edges for milling a variety of cast iron and steel grades.	7.30	7.00	11.50	5.90	0.80	1.20	0.10	0.35	1.00	7.00

При наявності електронної моделі корпусу РІ, оснащеного БНП розробляється технологічний процес його виготовлення, особливе місце у якому займає фрезерна з ЧПК операція, адже на ній виготовляються «гнізда» під БНП. Здебільшого дана операція виконується на п'ятикоординатному верстаті.

Розглянемо приклад фрезерної з ЧПК операції виготовлення корпусу РІ, оснащеного БНП із застосуванням п'ятикоординатного верстата DMU50V і САМ-системи Powermill.

Залежно від умов контакту поверхні деталі та вихідної інструментальної поверхонь (точковий чи лінійний) формується корпус інструмента і відповідно розміщується багатогранна непереточувна пластина (рис. 2.25). Через те, що базування БНП відбувається тільки по зовнішнім поверхням, форма поверхні «гнізда» співпадає з формою базових поверхонь пластини.

Скориставшись теорією розмірного ланцюга визначимо геометричні та кінематичні зв'язки між розмірами БНП, «гнізда» та закріплюючого гвинта. За номінальним розміром та допуском вихідної ланки визначаємо відстань від вершини «гнізда» до осі різевого отвору та мінімальну величину ходу гвинта при закріпленні пластини.

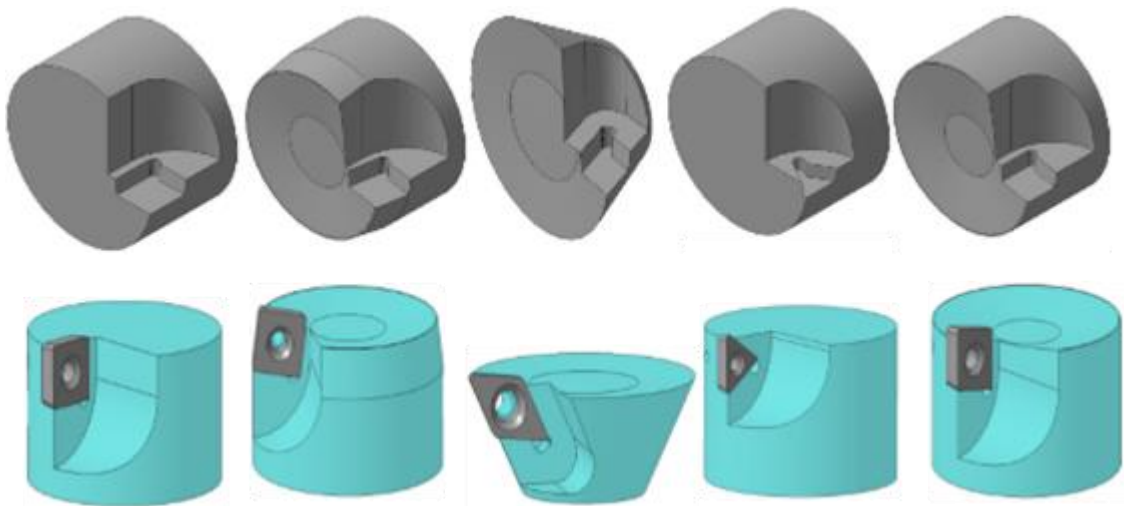


Рисунок 2.25 – Посадочні гнізда під різальні пластини

На рис. 2.26 показаний вузол закріплення пластини 2 у «гнізді» 3 з допомогою гвинта з конічною голівкою 1. Вихідною ланкою є A_{Σ} , номінальний розмір якої дорівнює 0.

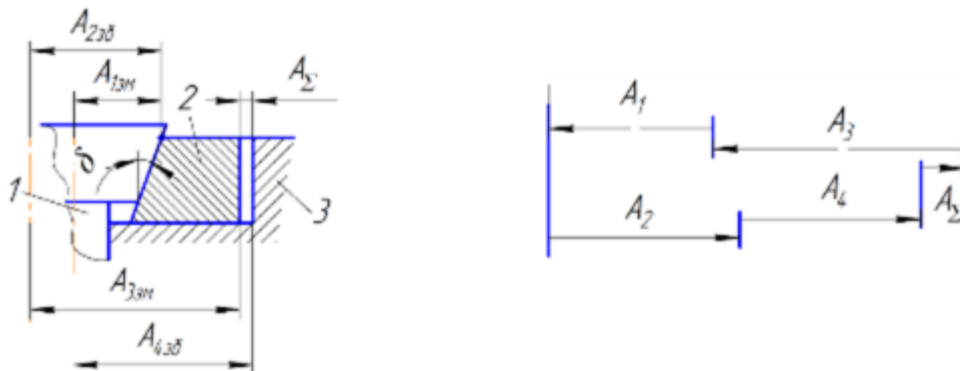


Рисунок 2.26 – Схема зіставних ланок приєднувальних розмірів

Рівняння розмірного ланцюга (рис. 2.26) наступне:

$$A_{\Sigma} = \Sigma A_{\text{зб}} - \Sigma A_{\text{зм}} = A_2 + A_4 - A_1 - A_3 = 0$$

Номінальні розміри ланок A_2 та A_3 цього рівняння визначаються конструктивними розмірами БНП (рис. 2.27): ланка $A_2 = d/2$, ланка $A_3 = n$ (або $A_3 = m$, залежно від розміщення БНП у «гнізді»).

Ланка A_1 також залежить від A_2 : $A_1 < A_2$. Тоді

$$A_4 = A_1 + A_3 - A_2.$$

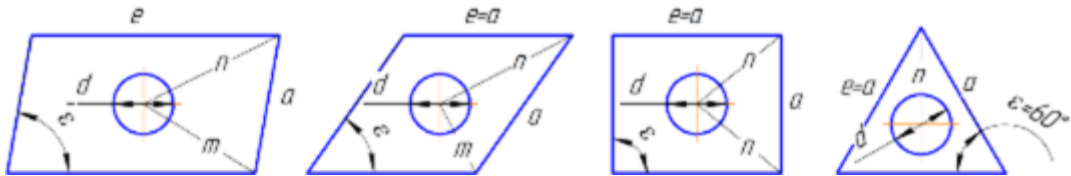


Рисунок 2.27 – Схема визначення конструктивних розмірів БНП

Для найпоширеніших форм (рис. 2.27) параметри n , m визначаються за формулами:

$$n = \frac{(k-1)\sqrt{e^2 + 2ae \cos(\varepsilon) + a^2}}{6},$$

$$m = \frac{(k-1)\sqrt{e^2 - 2ae \cos(\varepsilon) + a^2}}{6},$$

де k – кількість вершин у вибраної форми пластини.

Допуски на ланки A_2 та A_3 за каталогами фірм-виробників БНП, допуск на A_1 за 12-м квалітетом, допуск на A_4 за 8-м квалітетом. Визначаємо допуск на вихідну ланку

$$T_{\Sigma} = T_{A_2} + T_{A_3} + T_{A_4} + T_{A_1}.$$

Тобто $A_{\Sigma \min} = 0$, $A_{\Sigma \max} = T_{\Sigma}$. Звідси визначаємо величину ходу гвинта h при закріпленні пластини $h = \frac{A_{\Sigma \max}}{\tan \delta}$.

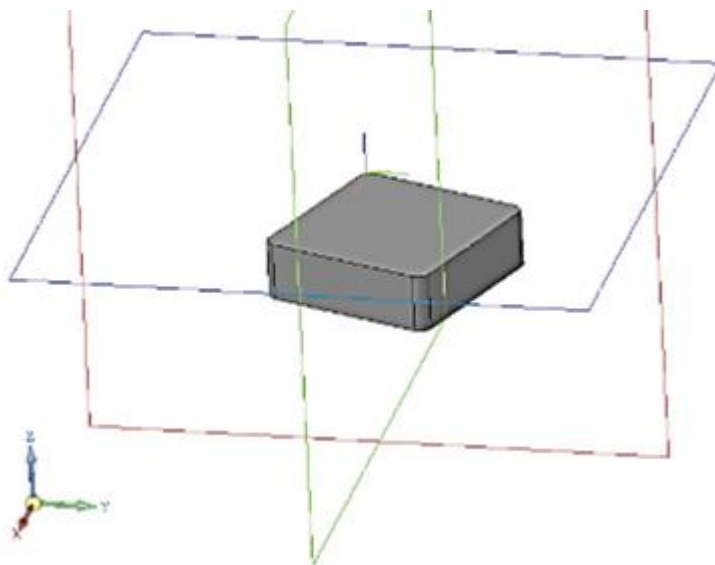


Рисунок 2.28 – Схема орієнтації різальної пластини

Послідовність проектування

1. Вибираємо із каталога БНП, яка за формою, розмірами та геометрією найбільш задовольняє вимоги конструкції майбутнього інструмента.
2. Встановлюємо її у системі координат хуz відповідно до схеми, показаній на рис. 2.7 (рис. 2.28).
3. За формулами (2.4)-(2.8) визначаємо кути повороту θ_1 та θ_2 . Аналізуємо наближенність отриманої геометрії у статичній системі координат до заданих (оптимальних) значень.
4. Повертаємо БНП навколо осей x , y на кути θ_1 та θ_2
5. Відповідно до заданої форми вихідної інструментальної поверхні проектуємо корпус (рис. 2.28).
6. Призначаємо кількість лез і розміщуємо БНП у корпусі (рис.2. 29).
7. Вирізуємо «гнізда» (рис.2.30).
8. Створюємо стружкові канавки та виконуємо інше необхідне конструкторське доопрацювання (рис. 2.31, 2.32).

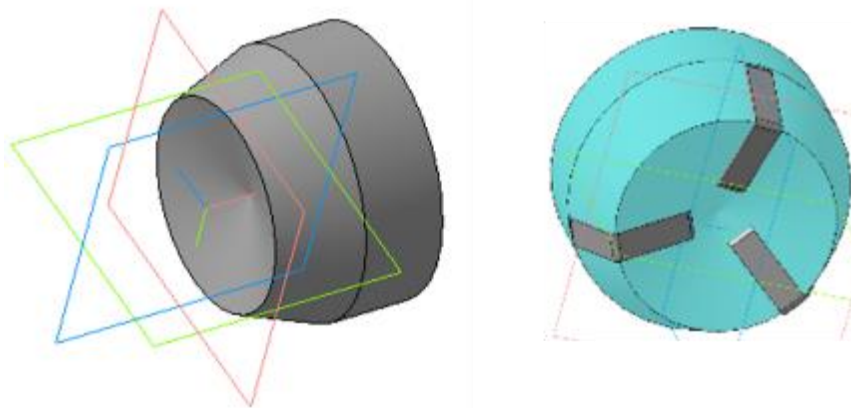


Рисунок 2.29 – Розміщення БНП у корпусі різальних пластин

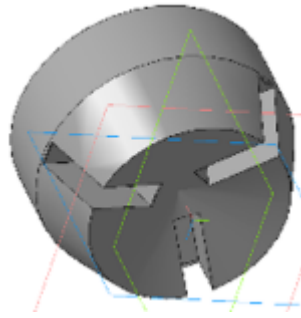


Рисунок 2.30 – Формування гізда під різальні пластини

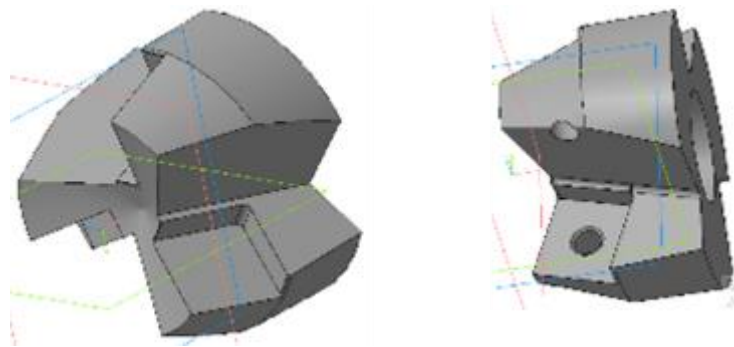


Рисунок 2.31 – Створення стружкових канавок під різальні канавки

2.3 Автоматизоване проектування модульної технологічного оснащення

На початковому етапі створення інформаційної системи важливо зрозуміти всі процеси, які необхідно автоматизувати. Найбільш зручною мовою моделювання бізнес-процесів є IDEF0 [65].

У IDEF0 система розглядається як сукупність взаємодіючих етапів або функцій. Така чисто функціональна орієнтація є принциповою, оскільки функції системи аналізуються незалежно від об'єктів, якими вони оперують. Це дозволяє більш чітко змодельовати логіку і взаємодію процесів проектування.

Для створення діаграм за нотацією IDEF0 використана програма AllFusion Process Modeler 7 (BPwin). При створенні нової моделі створюється контекстна діаграма функціональної моделі процесу проектування ВП, яка в

найбільш узагальненому вигляді описує процес проектування ВП (рис. 2.32). Декомпозиція процесу проектування ВП відображає структурні етапи комплексного підходу до проектування ВП (рис. 2.33).

Даний етап призначений для аналізу технологічних особливостей заготовки (рис. 2.34). Аналіз 3D-моделі дозволяє визначити функціональні поверхні заготовки, які можуть бути: оброблювані; базові; поверхні під притискачі.

Оброблювані поверхні (одна або кілька) – це поверхні, які потребують механічної обробки на заданій технологічній операції.

Базові поверхні (як правило це сукупність поверхонь) – це поверхні, які визначають положення заготовки у тривимірному просторі, позбавляючи заготовку певної кількості ступенів вільності (максимально шість – три переміщення, три обертання).

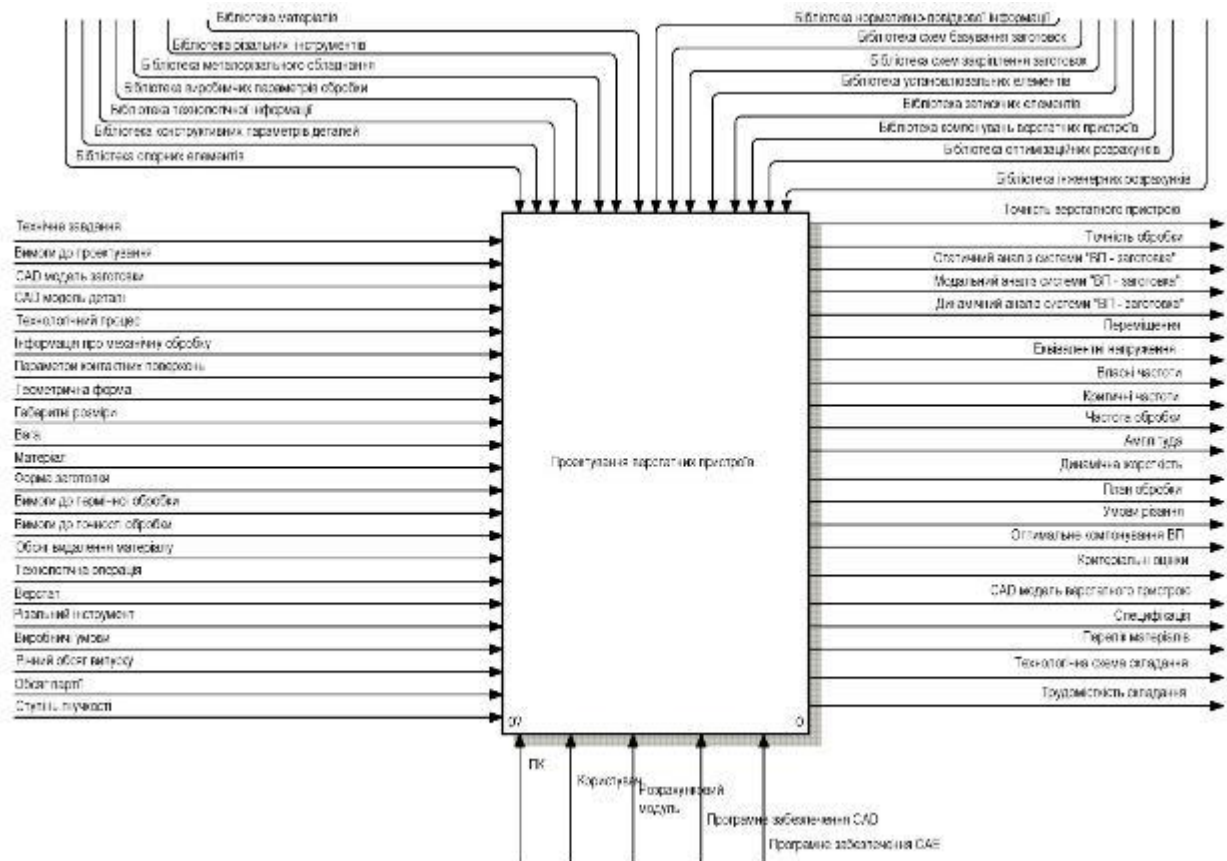


Рисунок 2.32 – Контекстна діаграма процесу проектування верстатного пристрою

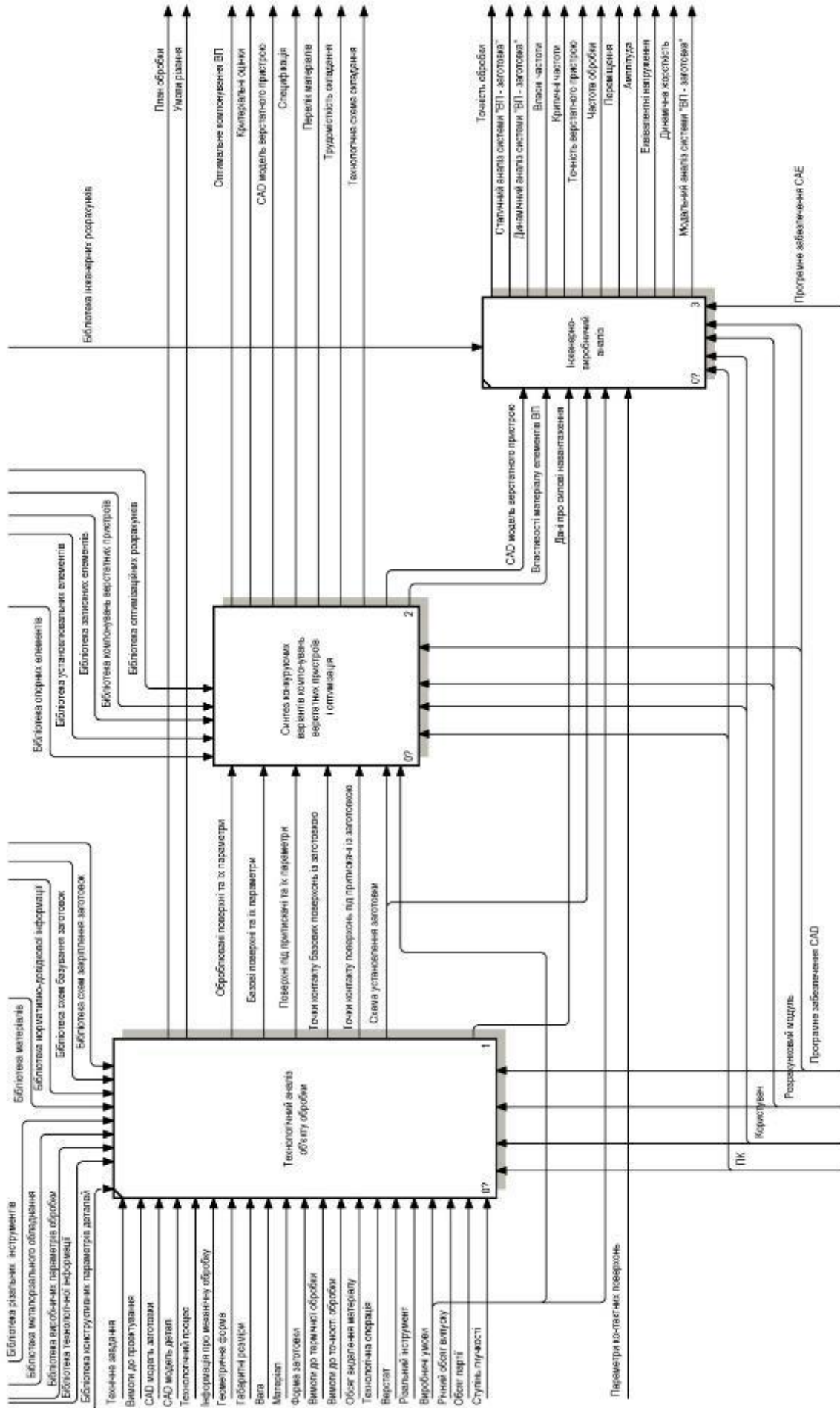


Рисунок 2.33 – Декомпозиція процесу проектування верстатного пристрою

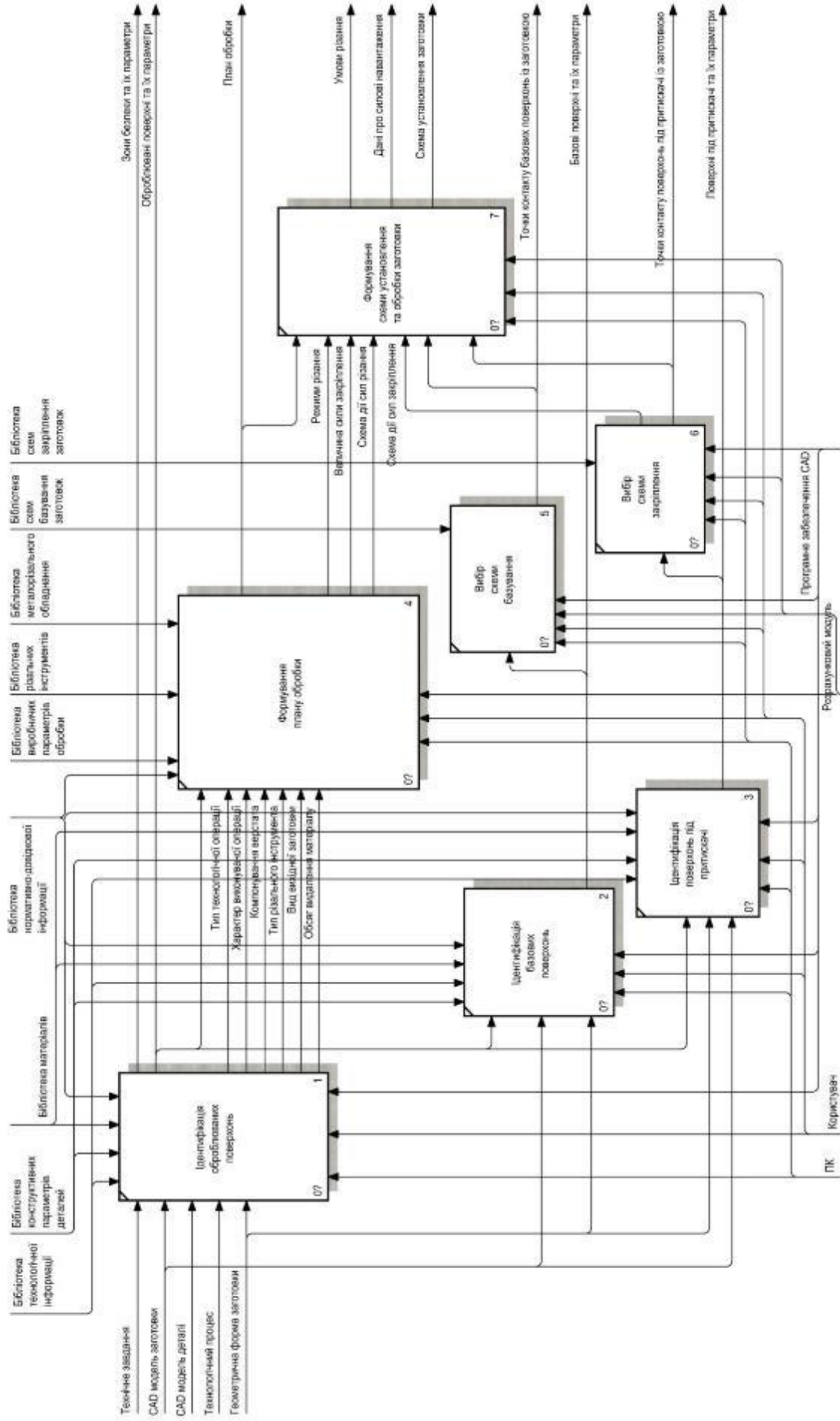


Рисунок 2.34 – Декомпозиція етапу технологічного аналізу об'єкту обробки

Поверхні під притискачі (одна або кілька) – призначені для прикладання визначеної сили закріплення з метою забезпечення незмінного положення заготовки у процесі формоутворення поверхонь.

Аналіз вищевказаних поверхонь дозволяє визначити з 3D-моделі: геометрію (форму) поверхонь; просторове розташування поверхонь відносно інших поверхонь; розмірні характеристики поверхонь (довжина, ширина, висота, діаметр). Із креслення (або іншої супроводжувальної документації) необхідно отримати інформацію: поле допуску для кожної з поверхонь; шорсткість поверхонь; марку матеріалу; твердість матеріалу заготовки; вид термічної обробки; інші технічні вимоги.

Маючи інформацію про оброблювані поверхні, формується план обробки поверхонь. На даному етапі визначаються: принципова схема обробки поверхонь; режими різання (глибина різання, подача, швидкість різання); сила різання; необхідна потужність верстата.

Сукупність базових поверхонь реалізують теоретичну схему базування із визначенням точок контакту заготовки з установлювальними елементами ВП.

Аналіз поверхонь під притискачі дозволяє вибрати одну з типових схем закріплення, а також точки контакту заготовки з затискними елементами.

На основі плану обробки, схем базування та закріплення заготовки формується схема установлення та обробки заготовки з вказівкою величин та напрямків дії сил різання та закріплення у визначеній системі координат.

Етап складається з двох підетапів, структурно-функціональну модель (рис.2.35). На підетапі синтезу (рис. 2.36) на основі розроблених правил, враховуючи обрані схему базування та схему закріплення заготовки, вибираються установлювальні та затискні елементи, які відповідають заданим параметрам. Відповідно до габаритних розмірів заготовки, вибраним схемам базування та закріплення заготовки здійснюється вибір опорних елементів.

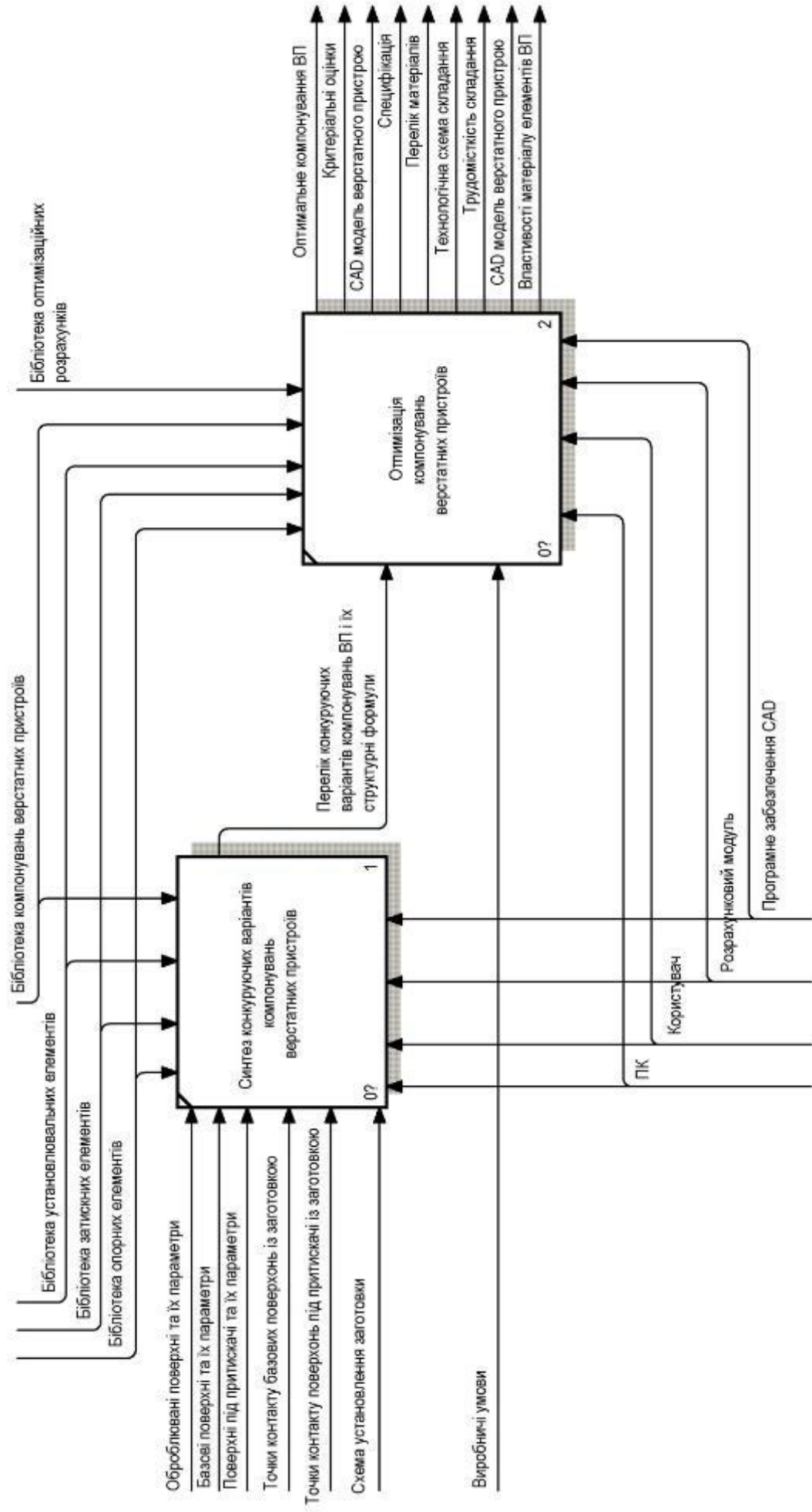


Рисунок 2.35 – Декомпозиція етапу синтезу та оптимізації компонувань верстатних пристроїв

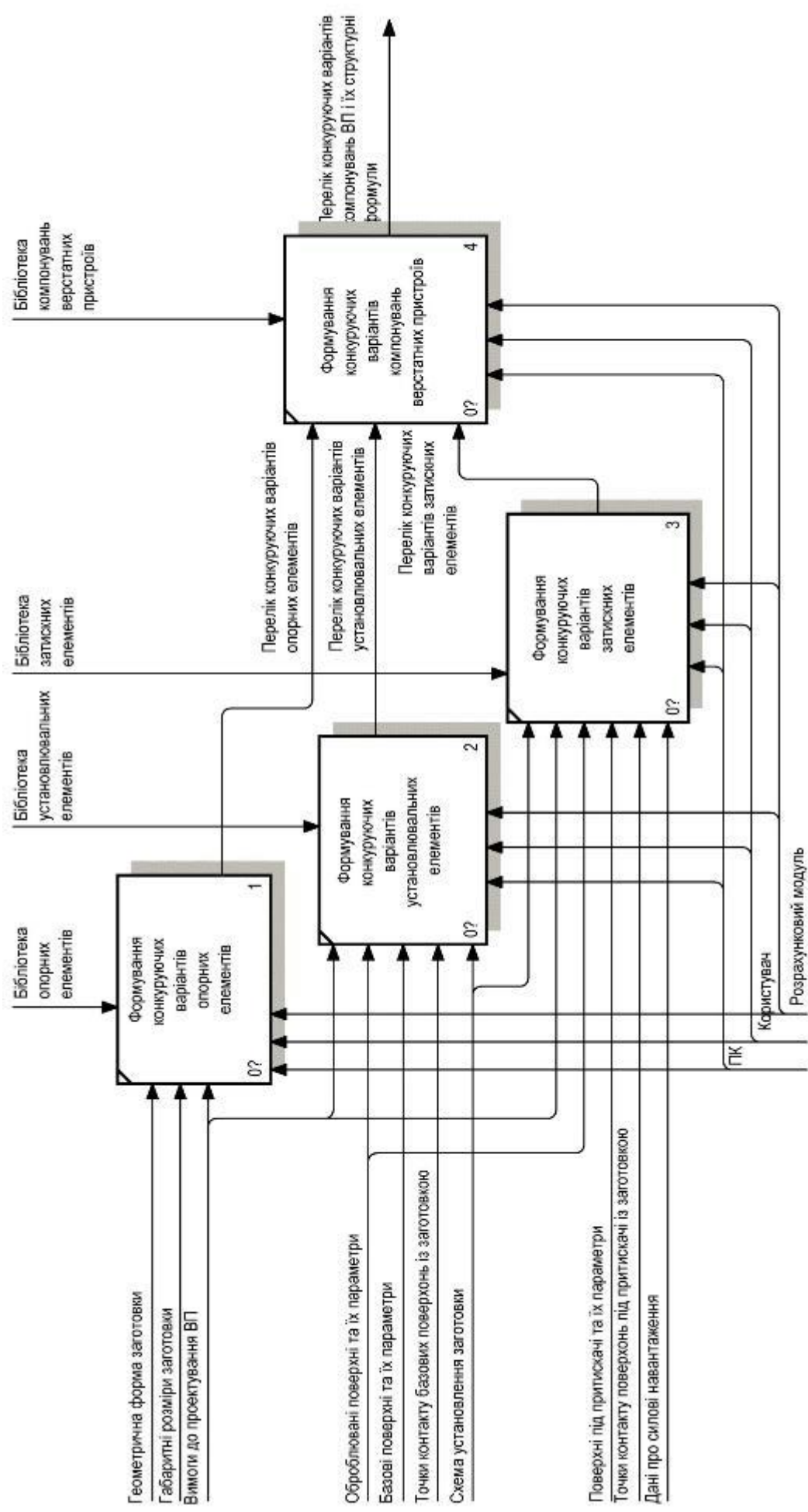


Рисунок 2.36 – Декомпозиція етапу синтезу конкурентних варіантів компонентів ВП

Це дозволяє сформувати сукупності конкуруючих варіантів опорних, установлювальних і затискних елементів. Далі на їх основі та з урахуванням раніше створених компонувань ВП, які містяться у бібліотеці компонувань ВП, відбувається формування конкуруючих варіантів компонувань ВП за розробленим алгоритмом [2].

Впровадження під етапу оптимізації (рис. 2.37) дозволяє обирати оптимальне компонування ВП для конкретних виробничих умов на основі багатокритеріальної оптимізації. Першим етапом є вибір компонувань ВП, які задовольняють системі технічних обмежень, базуючись на математичну модель, а також нормативно-довідкову інформацію. Для компонувань ВП, які залишились внаслідок накладання технічних обмежень, виконується розрахунок чисельних параметрів за кожним критерієм оптимальності. Далі здійснюється багатокритеріальна оптимізація за методом послідовних поступок [75]. У результаті оптимізаційної задачі отримуємо оптимальне компонування ВП із визначеними критеріальними оцінками.

Проведення інженерного аналізу є вкрай важливим етапом, оскільки це дозволяє проконтролювати параметри спроектованого ВП. На цьому етапі передбачається можливість вибору задач, які відповідають конкретній проектній задачі (рис. 2.38). Вибір задач та їх порядок залежать від сформованих вимог до проектування ВП та виробничих умов, для яких проектується ВП. Важливим під етапом є дослідження системи «ВП – заготовка» (рис. 2.39). Дослідження точності обробки деталей проводиться за методикою [76], аналіз стійкості рівноважного стану системи, аналіз напружено-деформованого стану, модальний аналіз, гармонічний аналіз проводяться за методикою [90].

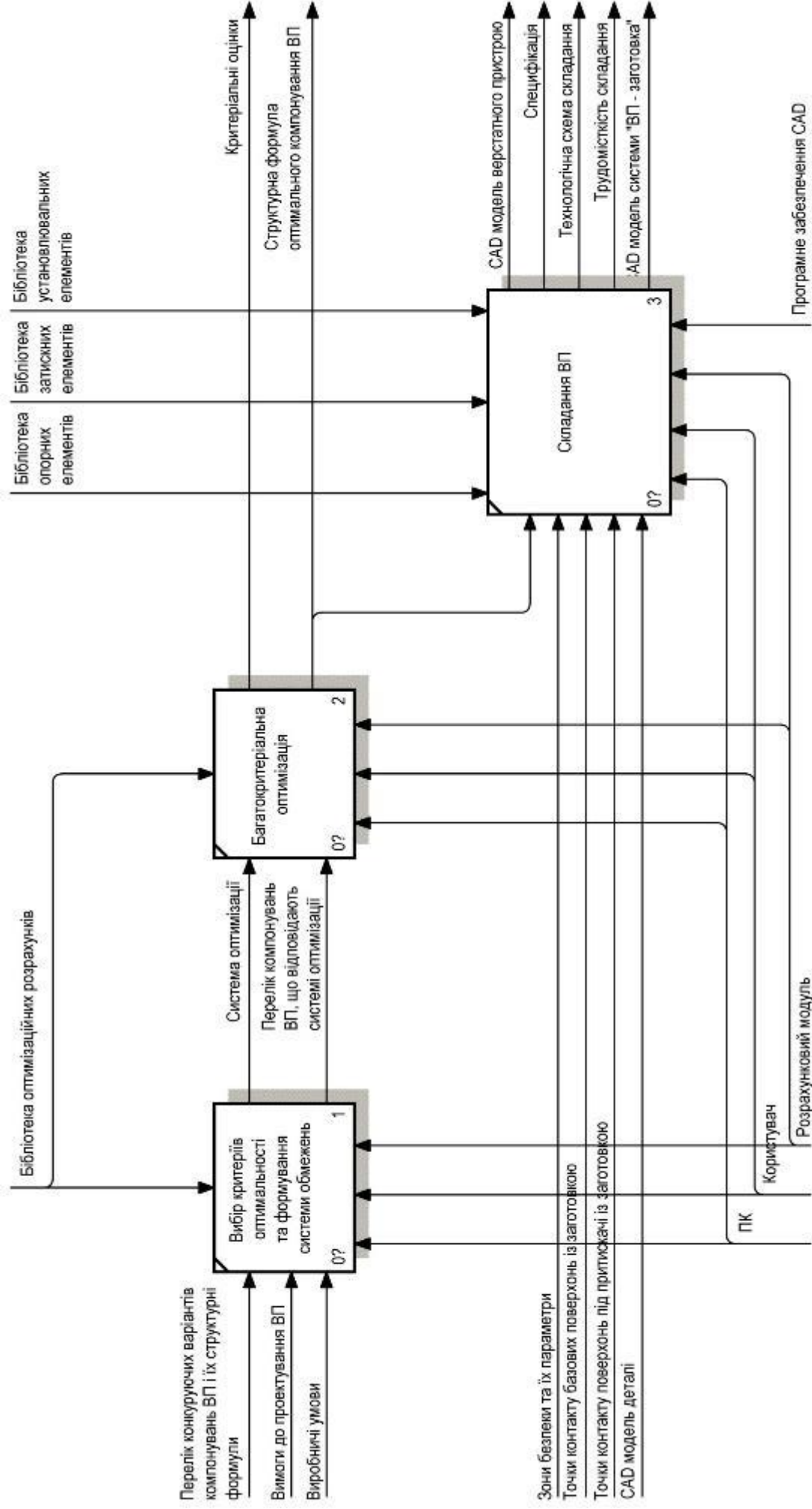


Рисунок 2.37 – Декомпозиція етапу оптимізації компонувань ВП

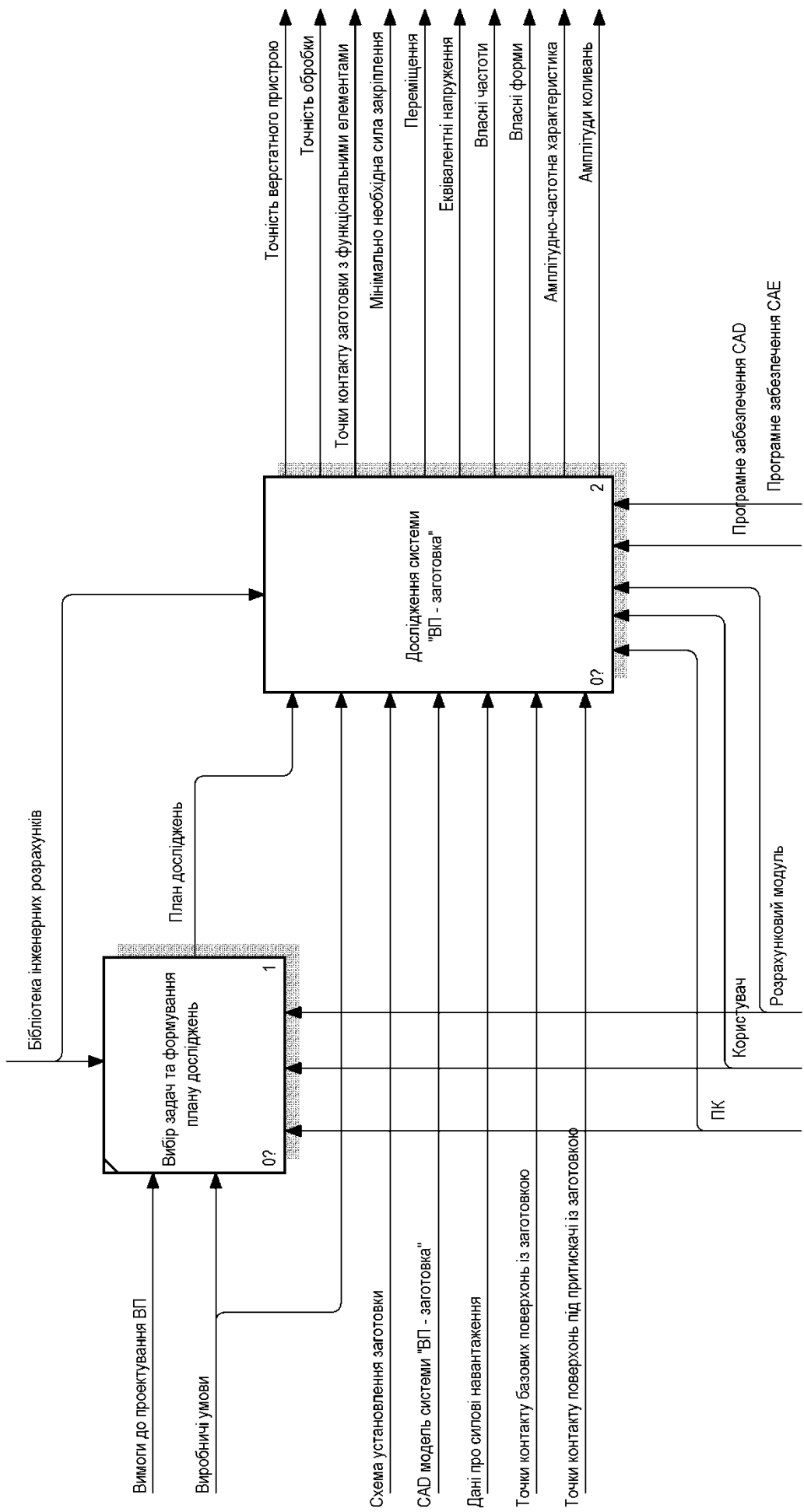


Рисунок 2.38 – Декомпозиція етапу інженерно-виробничого аналізу

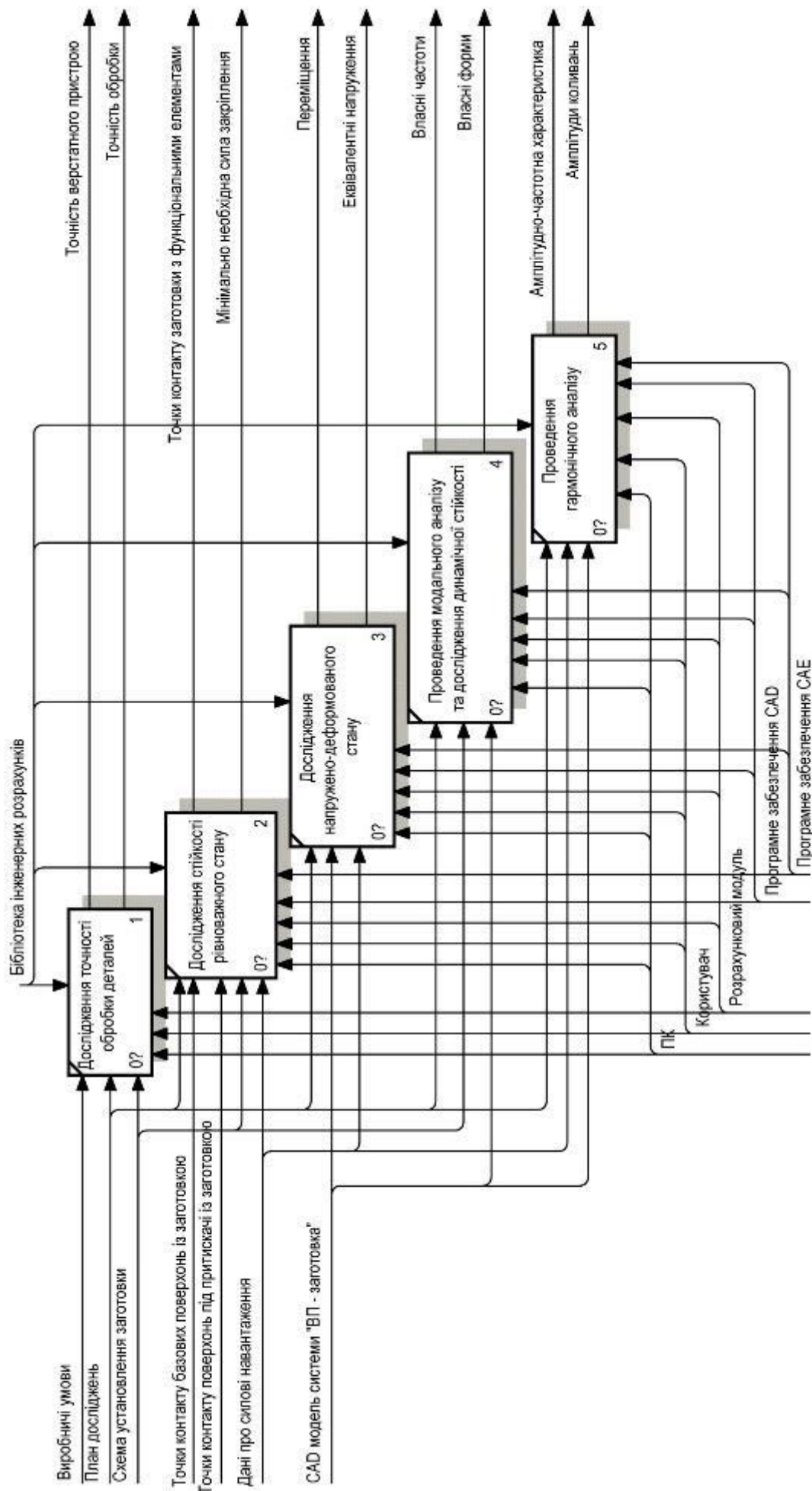


Рисунок 2.39 – декомпозиція етапу дослідження системи «ВП – заготовка»

Використовуючи CAD/CAE системи створюється електронна модель різального інструмента (рис. 2.40). На цьому етапі, залежно від умов контакту поверхні деталі та вихідної інструментальної поверхонь (точковий чи лінійний), формується корпус інструмента і відповідно розміщуються багатогранні непереточувані пластини.

Вибравши із каталога БНП, яка за формою, розмірами та геометрією найбільш підходить до конструкції майбутнього інструмента, встановлюють її у системі координат хуз відповідно до схеми, показаній на рис. 2.20. В САЕ, за формулами (2.4) - (2.8), визначають кути повороту θ_1 та θ_2 і в САД повертають БНП навколо осей x , y на ці кути відповідно. Призначивши кількість лез, розміщують БНП у корпусі, створюють стружкові канавки та виконують інше конструкторське доопрацювання.

Через те, що базування БНП відбувається тільки по зовнішнім поверхням, форма поверхні «гнізда» співпадає з формою базових поверхонь пластини.

При наявності електронної моделі корпусу РІ, оснащеного БНП розробляється технологічний процес його виготовлення, особливе місце у якому займає фрезерна з ЧПК операція, адже на ній виготовляються «гнізда» під БНП. Здебільшого дана операція виконується на п'ятикоординатному верстаті.

Для реалізації технологічного процесу виготовлення корпусу РІ, його електронна модель імпортується в САМ – систему для створення керуючих програм для верстатів з ЧПК (рис. 2.41). Обирається схема базування, моделюється пристосування, допоміжний та різальний інструменти.

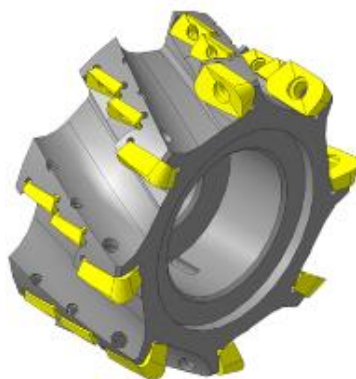


Рисунок 2.40 – Електронна модель фрези

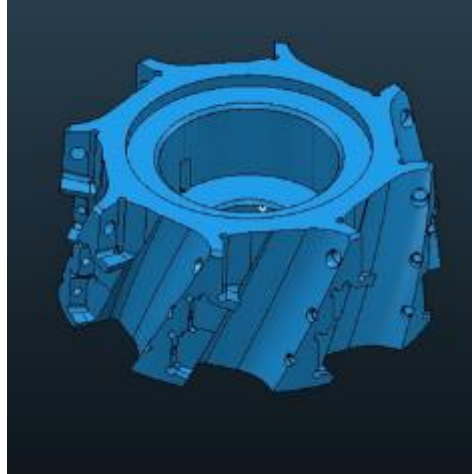


Рисунок 2.41 – Модель корпусу РІ, імпортована в САМ – системі Powermill

Формують стратегії обробки корпусу та генерують робочі траєкторії. Останні перевіряються на наявність зіткнень елементів технологічної системи. На рисунку 2.42 показана симуляція обробки із застосуванням п'ятикоординатного верстата мод. DMU50V.

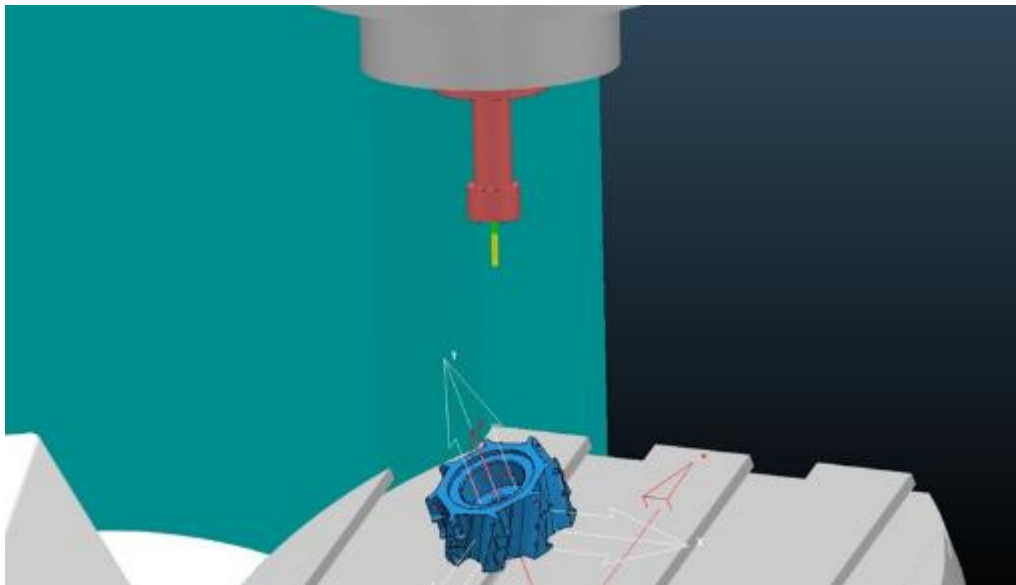


Рисунок 2.42 – Симуляція обробки корпусу РІ, оснащеного БНП, із застосуванням п'ятикоординатного верстата мод. DMU50V

За відсутності зіткнень переходять до постпроцесування згенерованих траєкторій. Особливістю постпроцесуванням п'ятикоординатної обробки є те, що

воно виконується відносно однієї системи координат, яка в нашому випадку співпадає з центром стола верстата.

Постпроцесувавши траєкторії Powermill, отримують керуючу програму для верстата з ЧПК і згідно неї виконують обробку корпусу РІ, оснащеного БНП.

2.4 Висновки

1. Розроблено конструкторсько-технологічну класифікацію деталей типу важелів, що включає в себе конструкторські та технологічні ознаки та визначений типовий представник деталей даного класу. На основі даної класифікації запропоновано структурний код, що може застосовуватись у інформаційно-пошукових системах та за яким будь-який важіль може бути віднесений до певного типорозміру ВП.

2. Обґрунтовано необхідність інтенсифікації механічної обробки деталей типу важелів шляхом розрахунків та порівняння норм часу типового та запропонованого ТП. Зменшення деяких норм часу за рахунок інтенсифікації ТП може досягати від 133% до 1100%.

3. Розроблено ВП для багатокординатної обробки деталей типу важелів з можливістю переналагодження, у якому враховано недоліки ВП, що застосовуються у типовому ТП.

4. Сформульована аналітична та графічна гіпотези залежності точності ВП від ступеня гнучкості та отримана математична модель, що представляє собою степеневу функцію, та потребує визначення її коефіцієнтів.

3 ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ЕЛЕМЕНТІВ МОДУЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОСНАЩЕННЯ

3.1 Методика проведення та виявлення резервів оптимізації модульного технологічного оснащення

Основним напрямком підвищення ефективності обробки заготовок у багатомономенклатурному виробництві є автоматизація виробничих процесів. Підвищення автоматизації відбувається за рахунок використання верстатів із ЧПК та швидкого переналагоджування при переході до обробки заготовок іншого типорозміру або конфігурації в межах технічних характеристик переналагоджуваних модулів.

Виконання умов до проектування ВП, що розглядалися у другому розділі, породжує наступні залежності та протиріччя [78, 79]:

- висока точність ВП залежить від його жорсткості;
- висока жорсткість ВП забезпечується за рахунок збільшення розмірів усіх елементів ВП;
- збільшення розмірів ВП призводить до збільшення металомісткості ВП, а це є неприпустимим, адже спричиняє зростання собівартості ВП, і як результат – збільшення собівартості деталей, які у ньому виготовляються. Також надмірна металомісткість ВП викликає потребу застосування підйомних механізмів при транспортуванні та встановленні на верстаті, а також верстатів з більшою вантажопідйомністю робочого стола, що також негативно впливає на собівартість кінцевого продукту, знижуючи його конкурентоспроможність.

Для вирішення вищевказаних протиріч можуть бути застосовані методи оптимізації. Проблема зниження металомісткості та відповідно маси конструкцій існувала завжди, проте зараз вона стала ще більш актуальною. Інженери-проектувальники за допомогою складних математичних розрахунків визначали оптимальні розміри елементів ВП, але даний підхід мав досить великі похибки через те, що для спрощення розрахунків та економії часу деталі складної

геометричної форми розкладалися на простіші складові, що розраховувалися окремо. У результаті цього для деталей машинобудування приймали коефіцієнт запасу міцності 2–2,5, а це, у свою чергу, збільшує металомісткість у стільки ж разів. Термін служби ВП визначається або терміном його роботи до капітального ремонту, або періодом випуску деталей, що у ньому обробляються, а це, як правило, не більше 5 років. Тому ВП із завищеною металомісткістю є економічно не вигідними, адже морально застарівають, не відпрацювавши свій запланований термін роботи.

Сучасні комп'ютерні технології дозволяють конструкторам технологічної оснастки застосовувати автоматизовані засоби оптимізації, які забезпечують швидкий та точний розрахунок спроектованих конструкцій на міцність, аналіз напружено-деформованого стану (НДС), визначення власних частот та власних амплітуд коливань ВП. Точність розрахунків та їх продуктивність при використанні комп'ютерних програм безсумнівно набагато вища, ніж при традиційному підході.

Тому на основі розробленого технічного рішення [77] запропоновано методику проведення та виявлення резервів оптимізації ВП за критерієм мінімізації маси ВП при забезпеченні достатньої його жорсткості.

Оптимізаційні розрахунки ВП за допомогою комп'ютерних програм запропоновано здійснювати за розробленим алгоритмом (рис. 3.1), який дозволяє визначити оптимальні розміри та конфігурацію ВП.

Розміри та металомісткість ВП можуть бути зменшені (при виконанні перш за все умови досягнення необхідної точності) за рахунок проведення наступних заходів при проектуванні:

- зменшення довжини вильотів консольних частин елементів ВП;
- використання у конструкціях ребер жорсткості, що розташовані у протилежному напрямку дії сили. При цьому можна уникнути необхідності збільшувати перетин деталі, що піддається навантаженням;

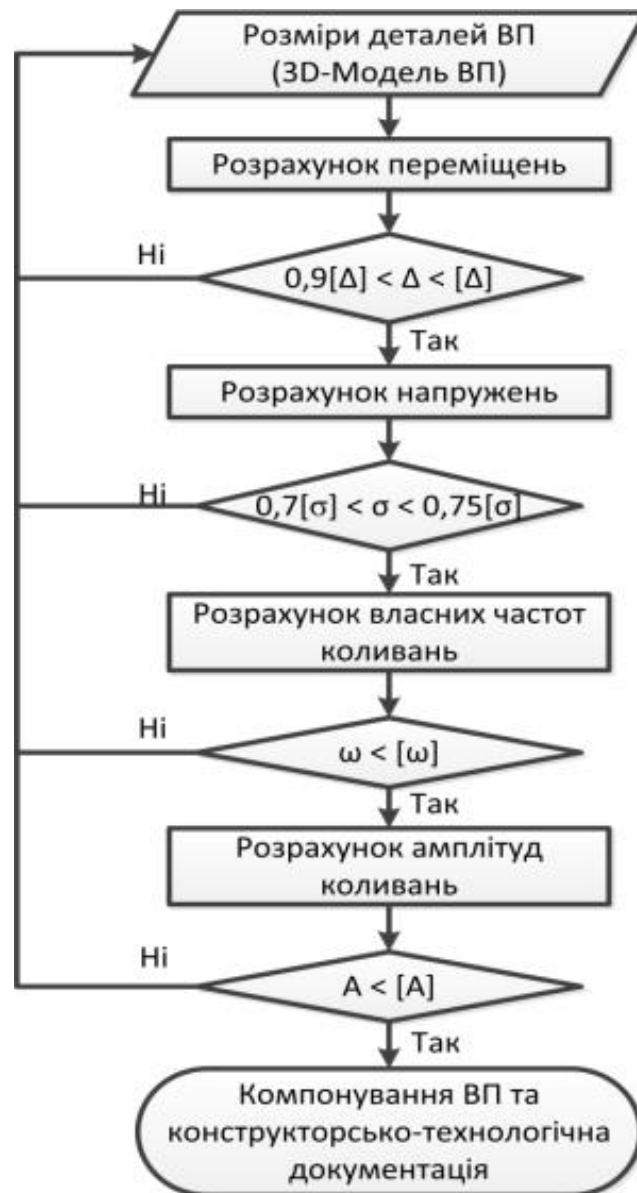


Рисунок 3.1 – Алгоритм параметричної оптимізації конструкції ВП

- проектування деталей з карманами та пустотілих конструкцій або хоча б при можливості мінімізувати товщину стінок;
- використання матеріалів з високою межею міцності;
- використання композиційних матеріалів;
- спрощення конструкції;
- зменшення кількості стиків.

Обмеженнями при проведенні оптимізації є:

- конструктивні особливості деталі, що вимагає застосування ВП ускладненої конструкції;

- ціна матеріалів, що мають високу межу міцності та складність їх механічної обробки;
- недостатнє поширення композиційних матеріалів у машинобудуванні та їх ціна;
- обмежені технологічні можливості обладнання на конкретному підприємстві.

Як і в багатьох проектних ситуаціях має місце протиріччя між основними вимогами. Наприклад ВП, що має велику масу може мати гарну стійкість, але бути не вигідним з економічної та експлуатаційної точок зору. Тому такі питання повинні вирішуватись оптимізаційними розрахунками. Для цього необхідно математично записати цільові функції (3.1) та технічні обмеження (3.2) для конкретної задачі, а саме досягнення мінімальної металомісткості ВП при дотриманні ним точнісних параметрів при обробці деталі.

$$M_{ВП} = \sum_{i=1}^n (\rho_i \cdot V_i) \rightarrow \min \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,7[\sigma] < \sigma < 0,75[\sigma] \\ 0,9[\Delta] < \Delta < [\Delta] \\ \omega > [\omega] \\ A < [A] \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Таким чином згідно алгоритму, обмеження будуть виражені величиною допустимих напружень $[\sigma]$, що обмежується межею міцності/текучості матеріалу, тому фактичні напруження σ повинні знаходитись у межах $(0,7-0,75)[\sigma]$, що відповідає коефіцієнту запасу міцності 1,3–1,4, значення яких обґрунтовані наявністю точних розрахункових моделей. Також вузький діапазон відхилень еквівалентних напружень забезпечує принцип рівномірності конструкції. Величина фактичних деформацій Δ_f повинна знаходитись у межах $(0,9-1)[\Delta]$. Допустиме значення деформації $[\Delta]$ визначається допуском на обробку і якщо $\Delta < 0,9 [\Delta]$, то є резерв для зменшення розмірів елементів ВП, адже допуски на обробку в цьому випадку будуть гарантовано витримані. Якщо $\Delta > [\Delta]$, то

необхідно збільшувати розміри елементів ВП, або здійснювати його перекомпонування.

Аналіз конструкції ВП для багатокоординатної обробки деталей типу важелів різних типорозмірів виконується на основі запропонованого технічного рішення [77].

За вихідними даними – креслення деталі «Важіль» та характеристикою запропонованого ВП, що вказана у [77], а саме можливість встановлення важелів з габаритами більшими у 1,6 рази за базову деталь, будуюмо важелі з мінімальними та максимальними габаритними розмірами (рис. 3.2 а, б) для даного типорозміру ВП.

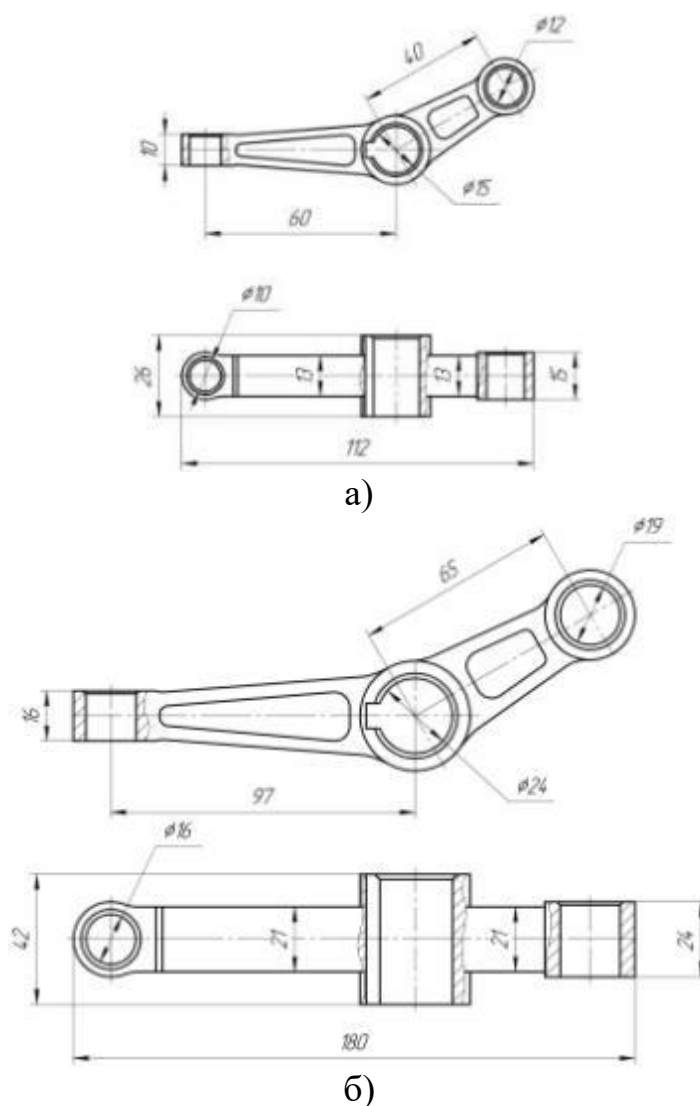


Рисунок 3.2 – Ескізи важелів з граничними розмірами у межах групи:
а – найменший типорозмір; б – найбільший типорозмір

Важелі з мінімальним та максимальним типорозмірами, що встановлені у ВП запропонованої конструкції зображені на рис 3.3.

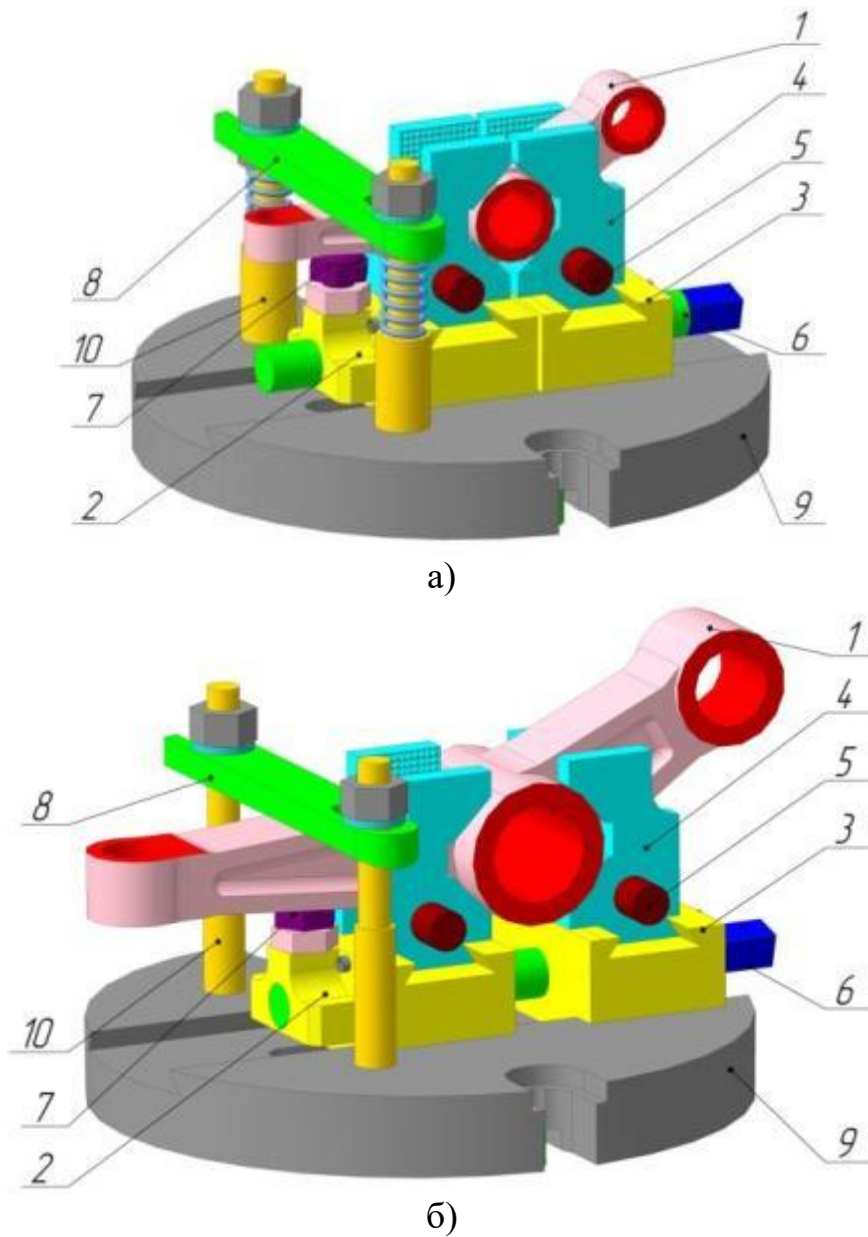


Рисунок 3.3 – Переналаджуваний установлювально-затискний модуль для обробки деталей типу важелів:

а – з мінімальним типорозміром; б – з максимальним типорозміром

1 – важіль; 2 – повзун нерухомий; 3 – повзун рухомий; 4 – призма;
5 – гвинт поперечний; 6 – гвинт поздовжній; 7 – упор; 8 – прихоплювач;
9 – плита; 10 – шпилька

Під час здійснення аналізу виконано деталювання ВП згідно з рис. 3.3 та розглянуто можливість зміни розмірів кожної з деталей окремо. При цьому враховано необхідність зміни приєднувальних розмірів інших деталей, що

контактують з аналізованою [80, 81]. Як зазначено раніше, запропонований ВП дозволяє встановлювати та обробляти важелі різних типорозмірів у певному діапазоні, що складає одну розмірну групу.

Згідно з рис. 3.3 виконувався детальний аналіз можливості зміни розмірів всіх деталей (додаток В), спираючись при цьому на розміри стандартних деталей, що присутні у компонуванні ВП, та складена таблиця результатів оптимізаційного аналізу ВП.

3.2 Оптимізація технологічного процесу обробки модульного технологічного оснащення

Дослідження НДС виконувалось для визначення оптимальних розмірів ВП, які будуть задовольняти всім точнісним параметрам для обробки важелів у межах даної розмірної групи. При цьому визначались похибки при обробці, що виникають у результаті деформацій елементів ВП, та виконувалось порівняння їх з допустимими значеннями на відповідних операціях механічної обробки для важелів з мінімальними та максимальними розмірами. Допустимі значення похибок обмежуються допусками згідно з кресленням деталі «Важіль». Також дослідження НДС ВП передбачає перевірку на міцність, виявлення концентраторів напружень та елементів, де напруження більші, ніж допустимі для конкретного матеріалу, та при їх наявності удосконалення конструкції. На даному етапі досліджень виконувалась перевірка еквівалентних напружень, які виникають у місцях контакту між установлювально-затискними елементами та заготовкою у результаті дії сил закріплення та силових факторів процесу різання (сили різання та моменти), а також умови за допустимими напруженнями для деталей із конкретних матеріалів. Для цього поряд з вирішенням задачі з визначення НДС вирішувалась контактна задача. Механічні властивості матеріалів, які використовуються у моделі, наведено у табл. 3.1.

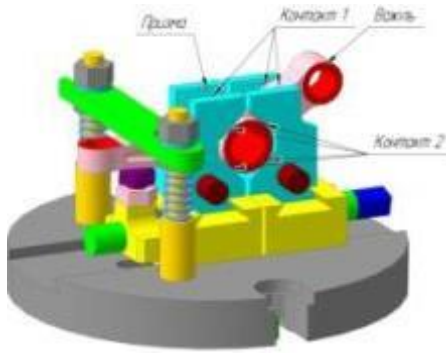
Таблиця 3.1 – Механічні властивості матеріалів заготовки та елементів ВП

Матеріал	Модуль пружності Е, ГПа	Коефіцієнт Пуассона μ	Густина ρ , кг/м ³	Границя міцності при розтягуванні $[\sigma_{\text{раст}}]$, ГПа	Границя міцності при стисненні $[\sigma_{\text{ск}}]$, ГПа	Границя текучості σ_T , ГПа
Сталь 40ХН ГОСТ 4543-71	200	0,3	7850	0,980	0,980	0,785
Сталь 45 ГОСТ 1050-88 (термооброблена)	200	0,3	7850	0,950	0,950	0,726

Першим етапом при вирішенні вищевказаних задач згідно оптимізаційного алгоритму було розроблення скінченноелементних розрахункових моделей ВП з максимальними та мінімальними розмірами. Кінематичні та силові граничні умови моделі ВП відповідають реальним схемам закріплення із зовнішнім навантаженням та задавалися жорстким закріпленням по нижній поверхні основи обох типорозмірів ВП, що еквівалентно встановленню ВП на стіл верстата. Усі елементи ВП жорстко зв'язані між собою шляхом об'єднання вузлів, а на поверхнях, які зв'язані одна з одною за рахунок дії сил тертя, встановлена можливість переміщення з відповідним коефіцієнтом тертя між цими поверхнями. Можливі переміщення елементів ВП із зазначенням типу контактів і характеристик контактних пар, а також коефіцієнтів тертя [82] між елементами наведено в табл. 3.2.

За допомогою розрахункового комплексу ANSYS [83, 84] отримані результати переміщень та напружень, що виникають у конкретних деталях та в місцях їх контакту. Значення максимальних еквівалентних напружень, визначених за IV гіпотезою міцності Мізеса [85, 86], та максимальних переміщень, що виникли при моделюванні процесу механічної обробки важелів зі сталі 40ХН для ВП з мінімальними та максимальними граничними розмірами наведені у табл. 3.3. Як приклад, ілюстрації з розрахунковими схемами навантажень, переміщеннями та напруженнями при обробці сталі 40ХН наведені у додатку Г.

Таблиця 3.2 – Схеми ВП та групи контактних пар запропонованого ВП

Схема розташування контактів	Характеристика реалізованих груп з'єднань
	<p>Контакт 1 – «бокові поверхні призм – бокові поверхні важеля»: поверхні призм – рифлені; поверхні заготовки – необроблені; коефіцієнт тертя $f = 0,7$;</p> <p>Контакт 2 – «робочі поверхні призм – циліндричні поверхні важеля»: поверхні призм – гладкі; поверхня заготовки – необроблена; коефіцієнт тертя $f = 0,2$.</p>

Таблиця 3.3 – Результати чисельного моделювання у програмному комплексі ANSYS для ВП з мінімальними та максимальними розмірами (матеріал важеля сталь 40ХН ГОСТ 4543-71)

Технологічний перехід, де виникають найбільші навантаження	Максимальні переміщення для ВП з розмірами, мм		Допустимі переміщення, мм	Максимальні напруження для ВП з розмірами, МПа		Допустимі напруження, МПа
	min	max		min	max	
Фрезерування торця бобишки головного отвору	0,01	0,035	0,2	219	150	650
Свердління головного отвору	0,023	0,052	0,2	115	230	650
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	0,11	0,1	0,15	591	229	650
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	0,17	0,456	0,15	1131	574	650
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному	0,05	0,07	0,12	210	142	650
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному	0,1	0,257	0,12	388	467	650

Для запобігання виникнення явища резонансу в процесі механічної обробки важеля необхідно, щоб частота власних коливань елементів ВП не співпадала з частотою процесу різання. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є призначення інших режимів різання [87]. Для цього за допомогою вбудованого модуля у програмному комплексі ANSYS визначаються частоти власних коливань ВП з мінімальними та максимальними розмірами та порівнюються з частотами, що виникають у процесі механічної обробки (табл. 3.4). Результати цього аналізу за необхідності дозволяють відлаштуватися від резонансу. Рисунки з виглядом форм власних коливань для ВП з мінімальними та максимальними розмірами наведені у додатку Д.

Таблиця 3.4 – Порівняльна таблиця власних частот, які виникають у процесі механічної обробки

Верстатний пристрій	1-ша критична частота, Гц	2-га критична частота, Гц	3-я критична частота, Гц	Частота процесу різання, Гц
З мінімальними розмірами	5404	5798	5935	72
З максимальними розмірами	2210	2466	3200	68

Із табл. 3.4 видно, що для ВП обох конструкцій резонансу не виникає, оскільки перша критична частота власних коливань ВП набагато вища за максимальну частоту процесу різання.

Для ВП з мінімальними розмірами критичні частоти вищі, що є закономірним, так як даний ВП має меншу масу та менші довжини вільотів консольних частин. Результати модального аналізу дозволяють висунути гіпотезу, що динамічна жорсткість ВП із мінімальними та максимальними розмірами буде достатньою для проведення механічної обробки без виникнення резонансних режимів.

Остаточню впевнитись у тому, що динамічна жорсткість ВП є достатньою, дозволить визначення величини амплітуди коливань у місцях оброблюваних

поверхонь, що виникають при зміні величини зовнішніх навантажень. Визначення амплітуд коливань можна виконати за допомогою гармонічного аналізу, тобто дослідження динамічного стану елементів системи «ВП – заготовка» при механічній обробці важелів у ВП з мінімальними та максимальними граничними розмірами.

Гармонічний аналіз виконувався за допомогою вбудованого модуля Harmonic Analysis програми ANSYS Workbench. Амплітуди динамічних складових сил та моментів різання обирались у межах 20% від номінального значення їх величин. Модель враховує кулонівське тертя між контактними поверхнями ВП, які мають приблизно однакову величину шорсткості (1,6 мкм за критерієм Ra) з коефіцієнтом 0,1 [87]. Величини коефіцієнтів тертя для контактних пар між елементами ВП та заготовкою взяті з табл. 3.1.

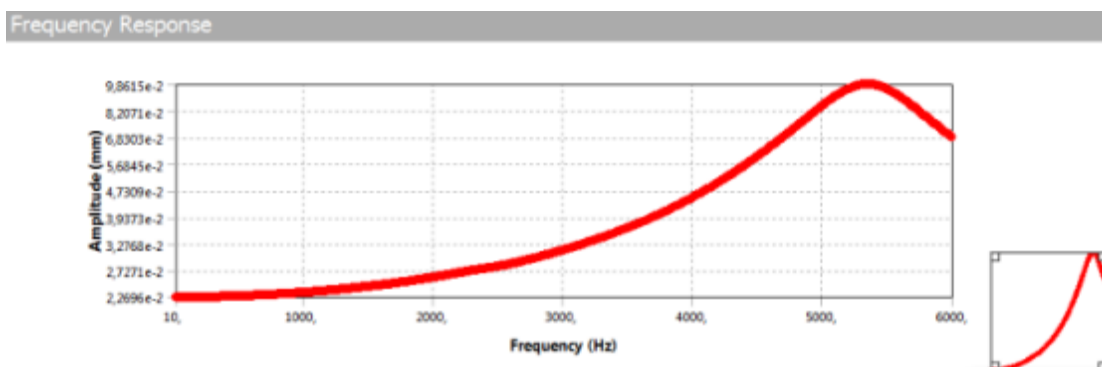
Діапазон частот коливань був вибраний із міркувань забезпечення охоплення трьох перших частот власних коливань всіх ВП, значення яких були отримані раніше. Максимальна третя частота власних коливань склала 5935 Гц, тому обираємо діапазон $0 \dots 6 \cdot 10^3$ Гц. Для вказаного діапазону частот коливань отримані амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) елементів ВП, виявлені до та зарезонансні режими. Попередні дослідження показали, що діапазон робочих частот процесу різання при обробці важеля не перевищує 100 Гц, що дозволяє обмежитись діапазоном $0 \dots 100$ Гц на графіках АЧХ при визначенні величини переміщень. Для забезпечення рівних умов порівняльний аналіз величини переміщень проводимо на максимально можливій частоті, що може виникнути у процесі обробки – 100 Гц для двох ВП.

У результаті чисельного моделювання динаміки системи «ВП – заготовка» отримані значення амплітуд коливань і резонансних частот, зумовлених процесом різання. Визначені значення переміщень точок у зоні обробки для конструкцій ВП з мінімальними та максимальними розмірами для найбільш навантаженого переходу (табл. 3.5, рис. 3.4). За результатами досліджень НДС найбільш навантаженим переходом для ВП з мінімальними та максимальними розмірами є

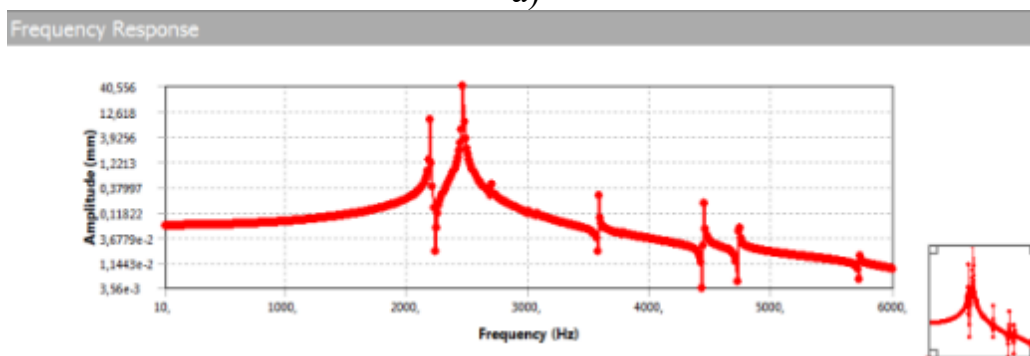
свердління бобишки допоміжного отвору, що розташований паралельно головному.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку динамічної жорсткості ВП при свердлінні бобишки допоміжного отвору, що розташований паралельно головному

Конструкція ВП	Номінальна величина сили різання, Н	Амплітуда динамічної складової сили різання, Н	Максимальна амплітуда переміщення точки, мкм	Розрахунков а динамічна жорсткість, 10^7 Н/мм
З мінімальними розмірами	4964	993	24	0,42
З максимальними розмірами	7944	1589	65	0,25



а)



б)

Рисунок 3.4 – АЧХ при свердлінні бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному для ВП з розмірами: а – мінімальними; б – максимальними

3.3 Дослідження модульного технологічного оснащення для типового технологічного процесу методами чисельного моделювання

Дослідження НДС, модальний та гармонічний аналіз також виконувались і для ВП типового ТП, конструкції яких представлені на рис. 3.8, 3.9 [89, 90] та результати порівнювались із запропонованим ВП для аналогічних переходів.

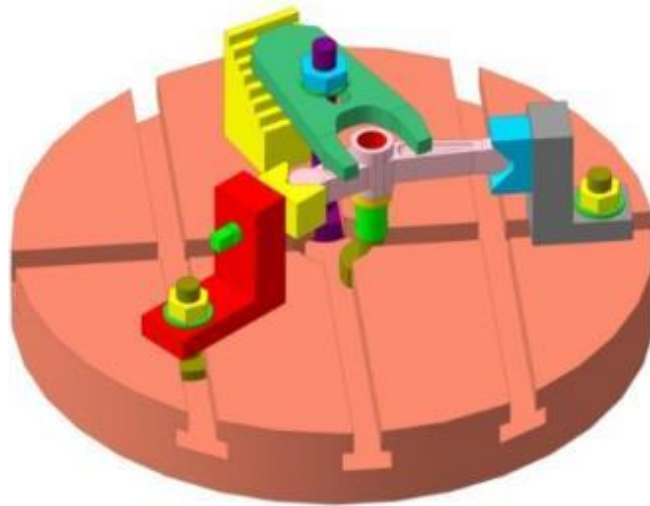


Рисунок 3.8 – ВП для операцій 05-15 типового ТП складений з елементів системи УЗП

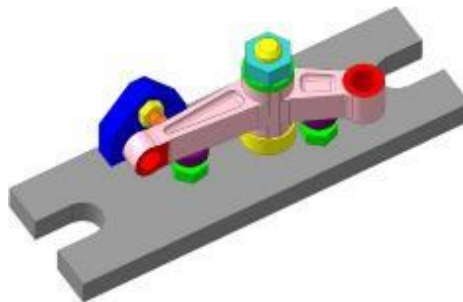


Рисунок 3.9 – ВП для операцій 20-30 типового ТП спеціальної конструкції

Дослідження НДС для запропонованого ВП прогресивного ТП необхідне для порівняння похибок при обробці у результаті деформацій елементів ВП, що виникають у ньому з аналогічними похибками у ВП типового ТП та їх допустимими значеннями на відповідних операціях механічної обробки для

різних матеріалів, які є найпоширенішими для деталей типу важелів (сталь 40ХН, сірий чавун СЧ20, алюмінієвий сплав АС 9). Механічні властивості матеріалів, які використовуються у моделях, наведено у табл. 3.8. Допустимі значення похибок обмежуються допусками згідно з кресленням деталі важіль (додаток А).

Скінченноелементні розрахункові 3D-моделі ВП запропонованого та типового ТП наведені на рис. 3.10–3.12, а їх характеристика у табл. 3.9 – 3.11 [93].

Таблиця 3.8 – Механічні властивості матеріалів заготовки та елементів ВП

Матеріал	Модуль пружності Е, ГПа	Коефіцієнт Пуассона μ	Густина ρ , кг/м ³	Границя міцності при розтягуванні $\sigma_{\text{раст}}$, ГПа	Границя міцності при стисненні $\sigma_{\text{сж}}$, ГПа	Границя текучості $\sigma_{\text{т}}$, ГПа
Сталь 40ХН ГОСТ 4543-71	200	0,3	7850	0,980	0,980	0,785
Сірий чавун СЧ 20 ГОСТ 1412-85	110	0,28	7200	0,245	0,451	–
Алюмінієвий сплав АС 9 ГОСТ 1853-93	100	0,27	2700	0,420	0,420	0,360
Сталь 45 ГОСТ 1050-88 (термооброблена)	200	0,3	7850	0,950	0,950	0,726

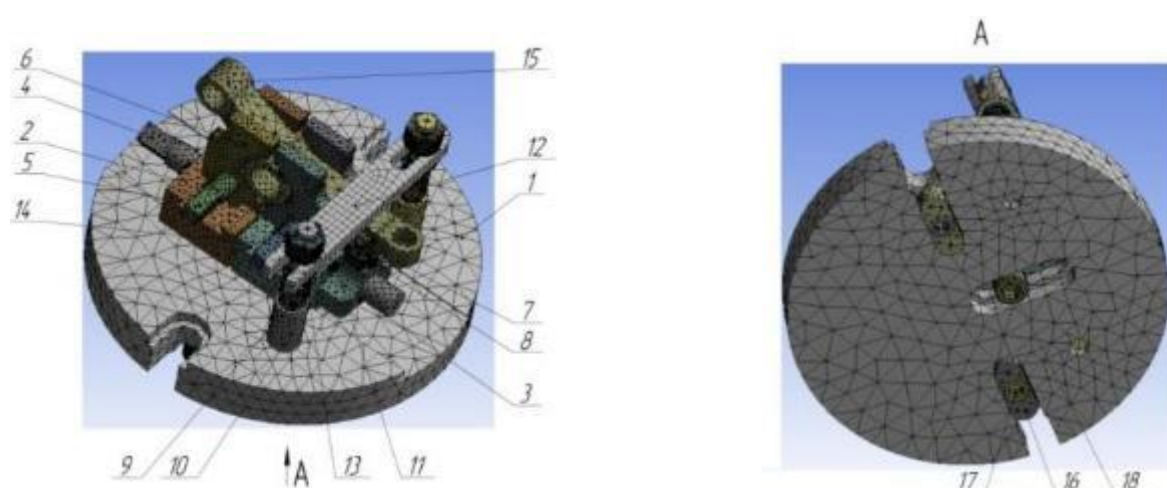


Рисунок 3.10 – Розрахункова 3D-модель запропонованого ВП для прогресивного ТП зі скінченноелементною сіткою

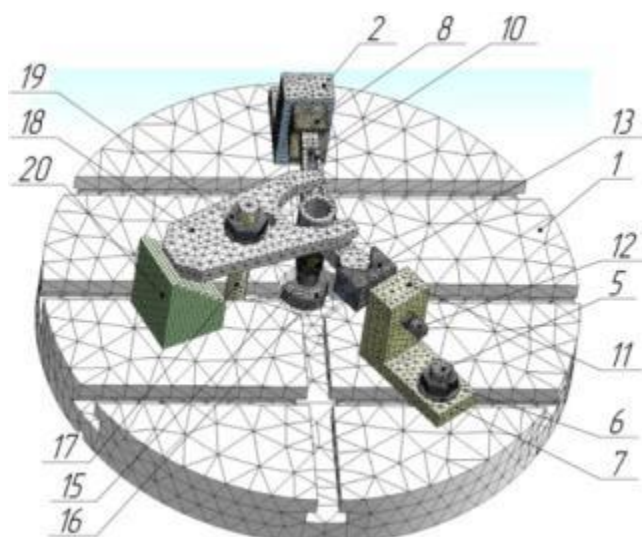


Рисунок 3.11 – Розрахункова 3D-модель ВП для типового ТП (операції 05-15) зі скінченноелементною сіткою

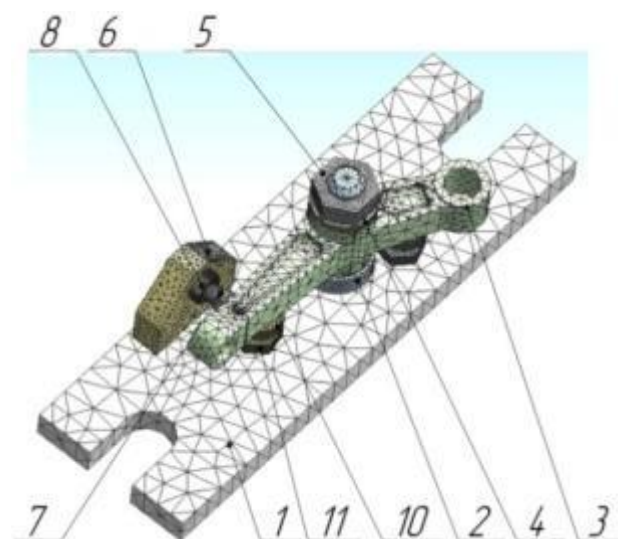


Рисунок 3.12 – Розрахункова 3D-модель ВП для типового ТП (операції 20-30) зі скінченноелементною сіткою

Таблиця 3.9 – Характеристика 3D-моделі запропонованого ВП із заготовкою для запропонованого ТП

Назва деталі	Позиція (рис.3.10)	Кількість	Матеріал	Кількість вузлів	Кількість елементів
Плита	1	1	сталь	7825	3896
Повзун лівий	2	1	сталь	3490	1711
Повзун правий	3	1	сталь	3281	1498
Гвинт поздовжній	4	1	сталь	568	276
Гвинт поперечний	5	2	сталь	325	158
Призма	6	4	сталь	1781	994
Упор	7	1	сталь	422	218
Гайка	8	1	сталь	287	139
Пружина	9	2	сталь	189	94
Шпилька	10	2	сталь	387	169

Продовження табл. 3.9

Гвинт стопорний	11	4	сталь	84	41
Прихват	12	1	сталь	2412	1217
Шайба	13	2	сталь	35	17
Гайка	14	2	сталь	48	26
Важіль	15	1	сталь/СЧ 20/ АС 9	4112	2345
Шпонка	16	2	сталь	587	315
Гвинт	17	2	сталь	176	89
Гвинт	18	1	сталь	195	94
Всього:	31	–	33546	17270	

Таблиця 3.10 – Характеристика 3D-моделі ВП із заготовкою для типового ТП (операції 05–15)

Назва деталі	Позиція (рис.3.11)	Кіль- кість	Матеріал	Кількість вузлів	Кількість елементів
Стіл	1	1	сталь	5525	2902
Опора призми	2	1	сталь	1936	1039
Шпонка	3	1	сталь	717	357
Гвинт шпонки	4	3	сталь	710	346
Сухар опори	5	2	сталь	357	159
Гайка сухаря опори	6	2	сталь	390	45
Шайба 12x20	7	3	сталь	233	24
Призма нерухома	8	1	сталь	1165	598
Штифт	9	2	сталь	332	50

Продовження табл. 3.10

Важіль	10	1	сталь/СЧ 20/ АС 9	4102	2312
Опора призми	11	1	сталь	750	339
Гвинт призми	12	1	сталь	1107	544
Призма рухома	13	1	сталь	844	406
Кільце стопорне	14	1	сталь	464	46
Втулка упора	15	1	сталь	795	374
Сухар	16	1	сталь	452	214
Шпилька	17	1	сталь	425	192
Прихват	18	1	сталь	652	273
Гайка прихвата	19	1	сталь	327	42
Сходинка	20	1	сталь	1312	220
Опора рифлена	21	1	сталь	535	245
Всього:		28	–	26095	14344

Таблиця 3.11 – Характеристика 3D-моделі ВП із заготовкою для типового ТП (операції 20–30)

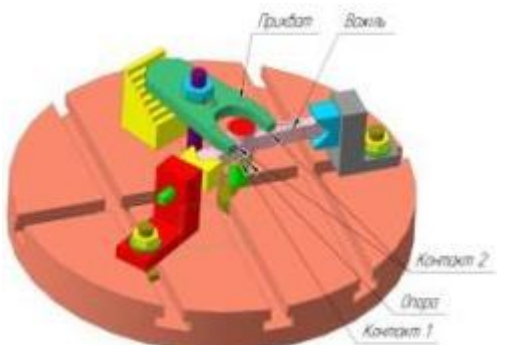
Назва деталі	Позиція (рис. 3.12)	Кількість деталей	Матеріал	Кількість вузлів	Кількість елементів
Плита	1	1	сталь	2135	1007
Оправка	2	1	сталь	1194	614
Важіль	3	1	сталь/СЧ 20/ АС 9	6139	3461
Шайба	4	1	сталь	221	23
Гайка	5	1	сталь	510	69

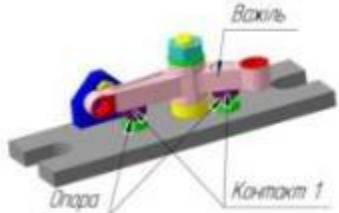
Продовження табл. 3.11

Опора	6	1	сталь	1053	538
Упор	7	1	сталь	381	172
Гайка упора	8	1	сталь	462	66
Гвинт	9	2	сталь	743	358
Опора рухома	10	2	сталь	349	158
Гайка опори	11	2	сталь	272	32
Всього:		14	–	14823	7046

Кінематичні та силові граничні умови моделі ВП відповідають реальним схемам закріплення та прикладання зовнішнього навантаження та задавалися жорстким закріпленням по нижній поверхні основи всіх ВП, що еквівалентно встановленню ВП на стіл верстата. Усі елементи ВП жорстко зв'язані між собою шляхом об'єднання вузлів, а на поверхнях, які зв'язані одна з одною за рахунок дії сил тертя, встановлена можливість переміщення з відповідним коефіцієнтом тертя між цими поверхнями. Можливі переміщення елементів ВП для типового ТП із зазначенням типу контактів і характеристик контактних пар, а також коефіцієнтів тертя [83] між елементами наведено в табл. 3.12. Схема та групи контактів запропонованого ВП з оптимальними параметрами взяті з табл. 3.2.

Таблиця 3.12 – Схеми ВП та групи контактних пар ВП типового ТП

Схема розташування контактів	Характеристика реалізованих груп з'єднань
	<p>Контакт 1 – «опора – торець важеля»: поверхня опори – рифлена; поверхня заготовки – необроблена; коефіцієнт тертя $f=0,7$;</p> <p>Контакт 2 – «затискні поверхні прихоплювача – бокові поверхні важеля»: Поверхні прихоплювача – гладкі;</p>

	Поверхні заготовки – необроблені; коефіцієнт тертя $f=0,2$.
	Контакт 1 – «опора – бокові поверхні важеля»: поверхні опор – рифлені; поверхні заготовки – необроблені; коефіцієнт тертя $f=0,7$.

Аналогічно до оптимізаційного алгоритму за допомогою розрахункового комплексу ANSYS [102] отримані результати переміщень та напружень, що виникають у конкретних деталях та в місцях їх контакту. Значення максимальних еквівалентних напружень, визначених за IV гіпотезою міцності Мізеса [85, 86], та максимальних переміщень, що виникли при моделюванні процесу механічної обробки важелів зі сталі 40ХН, чавуну СЧ20 та алюмінієвого сплаву АС9 для ВП типового та прогресивного ТП, наведені у табл. 3.13, а деякі ілюстрації у додатку Ж.

Із проаналізованих результатів виявлено, що максимальні еквівалентні напруження, визначені за IV гіпотезою міцності, які виникають у деталях та на їх контактних поверхнях, не перевищують допустимих значень для даних матеріалів при заданих навантаженнях. Виявлено, що переміщення в усіх випадках обробки є пружними. У процесі чисельного моделювання встановлено, що максимальні переміщення та напруження, що виникають при обробці однакових поверхонь важеля у ВП типового ТП більші, ніж при обробці у ВП прогресивного ТП.

Таблиця 3.13 – Порівняльна таблиця результатів чисельного моделювання у програмному комплексі ANSYS

Технологічний перехід, де виникають найбільші навантаження	Матеріал важеля	Максимальні переміщення, мм		Максимальні напруження, МПа	
		Типовий ТП	Запропонований ТП	Типовий ТП	Запропонований ТП
Фрезерування торця бобишки головного отвору	40ХН	0,08	0,017	132	174
	СЧ20	0,03	0,015	78	122
	АС9	0,03	0,015	74	121

Продовження табл. 3.13

Свердління головного отвору	40ХН	0,02	0,019	72	101
	СЧ20	0,01	0,017	44	73
	АС9	0,01	0,019	38	61
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, паралельного головному	40ХН	0,18	0,11	604	589
	СЧ20	0,18	0,12	372	364
	АС9	0,17	0,14	299	288
Свердління бобишки допоміжного отвору, паралельного головному	40ХН	0,15	0,14	446	620
	СЧ20	0,15	0,13	295	420
	АС9	0,13	0,13	238	342
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному	40ХН	0,05	0,046	208	134
	СЧ20	0,05	0,05	143	91
	АС9	0,05	0,05	130	83
Свердління бобишки допоміжного отвору, перпендикулярного головному	40ХН	0,19	0,12	348	307
	СЧ20	0,23	0,16	302	243
	АС9	0,21	0,18	235	199

За допомогою вбудованого модуля Modal Analysis у розрахунковому комплексі ANSYS Workbench визначено частоти власних коливань ВП типового ТП, які порівняно з частотами дії знакозмінних компонент сил і моментів різання на всіх переходах свердлильно-фрезерно-розточувальних операцій [87]. Результати аналізу ВП типового ТП та їх порівняння із запропонованим ВП приведені у табл. 3.14. Рисунки з виглядом форм власних коливань для ВП типового та прогресивного ТП представлені у додатку Е.

Таблиця 3.14 – Порівняльна таблиця власних частот, які виникають у процесі механічної обробки у ВП типового та запропонованого ТП

Верстатний пристрій	Критична частота, Гц			Частота процесу різання, Гц
	1-ша	2-га	3-я	
Збірний для операцій 05–15 типового ТП	2186	2595	2835	72
Спеціальний для операцій 20–30 типового ТП	5888	7268	8250	72
Універсально-збірний переналаджуваний	5970	7830	8915	72

При розрахунках усі елементи ВП зв'язувались між собою шляхом об'єднання вузлів. Для деяких поверхонь елементів ВП передбачено можливість відносного переміщення з коефіцієнтом тертя. Типи контактів і характеристики контактних пар між поверхнями елементів узяті з табл. 3.12.

Із табл. 3.14 видно, що для розглянутих ВП явище резонансу не виникне, оскільки перша критична частота значно перевищує частоту процесу різання. Але можна зробити проміжний висновок, що розроблений ВП для реалізації запропонованого ТП є більш жорстким, ніж ВП для реалізації типового ТП, оскільки перша критична частота у 1,04 і 2,8 разів перевищує критичну частоту для ВП операцій 05–15 і 20–30 відповідно. Це свідчить про очікуване збільшення динамічної жорсткості розробленого ВП майже у 9 разів, що і треба перевірити за допомогою інструментів гармонічного аналізу.

Гармонічний аналіз виконувався за допомогою вбудованого модуля Harmonic Analysis програми ANSYS Workbench. Амплітуди динамічних складових сил та моментів різання обирались у межах 20% від номінального значення їх величин, як і при виконанні процесу оптимізації.

Граничні умови у моделях задавались з табл. 3.2 та 3.12 для запропонованого ВП та ВП типового ТП відповідно. У всіх моделях враховано кулонівське тертя між контактними поверхнями ВП з коефіцієнтом 0,1, як описано у попередніх розділах. Повний діапазон частот коливань та порівняльна частота були обрані виходячи з міркувань.

У результаті чисельного моделювання динаміки системи «ВП – заготовка» отримані значення амплітуд коливань і резонансних частот, зумовлених процесом різання. Визначені значення переміщень точок у зоні обробки для ВП типового та запропонованого ТП (табл. 3.15). Форми амплітуд коливань на найбільш навантажених переходах представлені на рис. 3.13–3.15.

Амплітуди коливань, що виникають на всіх переходах механічної обробки у спеціальному ВП та ВП з елементів комплексу УЗП більші, ніж у запропонованого ВП системи УЗПП у середньому на 0,01–0,02 мм. Це свідчить, що за інших рівних умов відхилення розмірів, форми і взаємного розташування

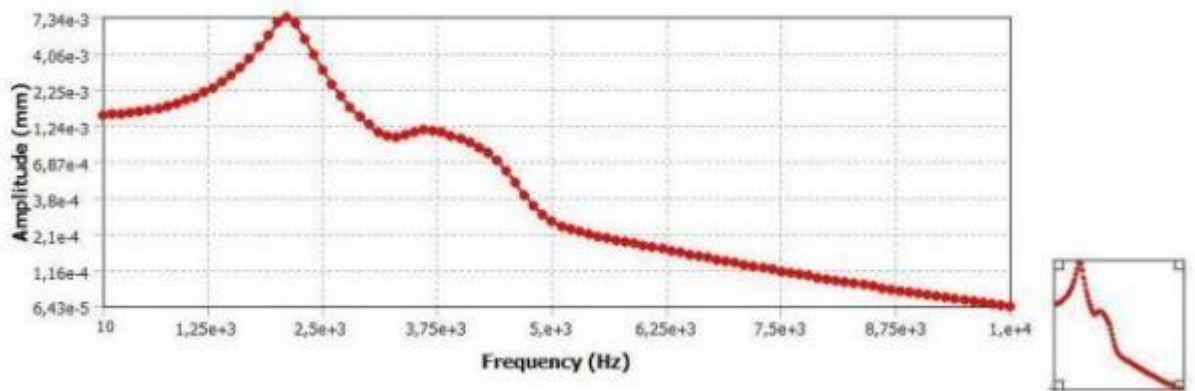
поверхонь деталі, що обробляється у ВП системи УЗПП є меншими, що сприяє підвищенню точності обробки.

Результати дослідження та порівняння динамічної жорсткості ВП для деяких переходів зведено до табл. 3.16. Дані табл. 3.16 засвідчують, що динамічна жорсткість запропонованого ВП з елементів системи УЗПП вища, ніж спеціального ВП, на 5% та у 15 разів вища за жорсткість ВП, складеного з елементів УЗП, що забезпечує підвищення показників точності при обробці деталей важелів [93, 94].

Таблиця 3.15 – Результати гармонічного аналізу

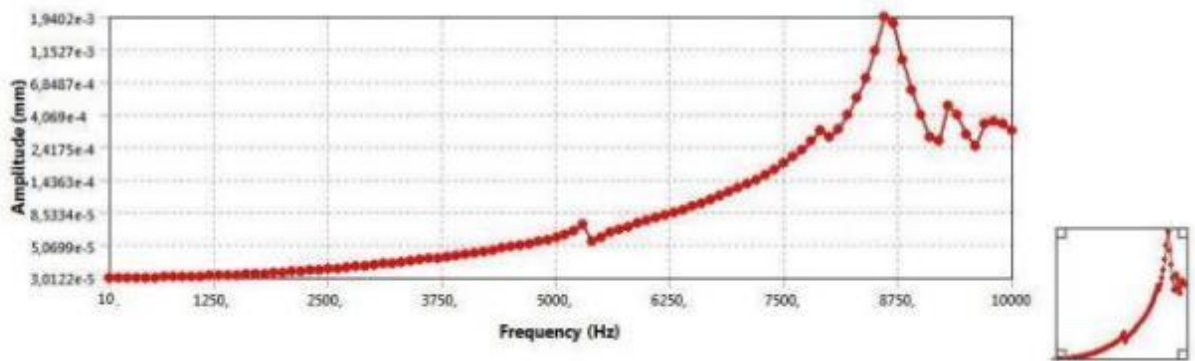
Технологічний перехід, де виникають найбільші навантаження	Матеріал важеля	Максимальна амплітуда, мкм	
		Типовий ТП	Запропонований ТП
Фрезерування торця бобишки головного отвору	40ХН	1,4	0,03
	СЧ20	1,1	0,024
	АС9	1,4	0,022
Свердління головного отвору	40ХН	24	1,7
	СЧ20	20	1,2
	АС9	21	1,2
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	40ХН	1,2	0,89
	СЧ20	1,2	0,77
	АС9	1,1	0,74
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	40ХН	12	11,5
	СЧ20	11	9,4
	АС9	12	11,4
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному	40ХН	1,4	1,3
	СЧ20	1,5	1,4
	АС9	3	1,9
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному	40ХН	16,1	15,3
	СЧ20	18,2	17,9
	АС9	15,1	14,5

Frequency Response



а)

Frequency Response



б)

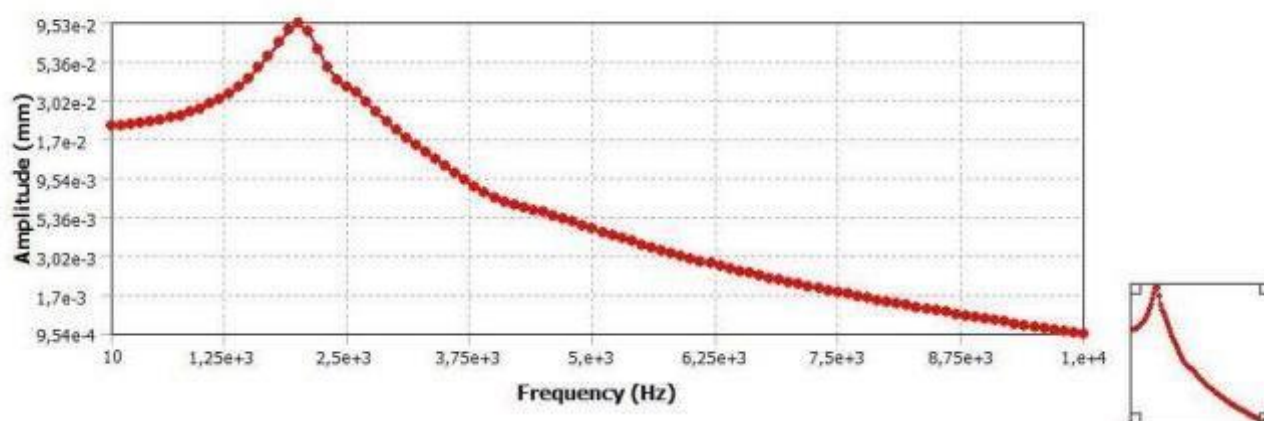
Рисунок 3.13 – АЧХ при фрезеруванні бобишки головного отвору для:

а – ВП, складеного з елементів комплекту УЗП;

б – ВП, складеного з елементів системи УЗПП

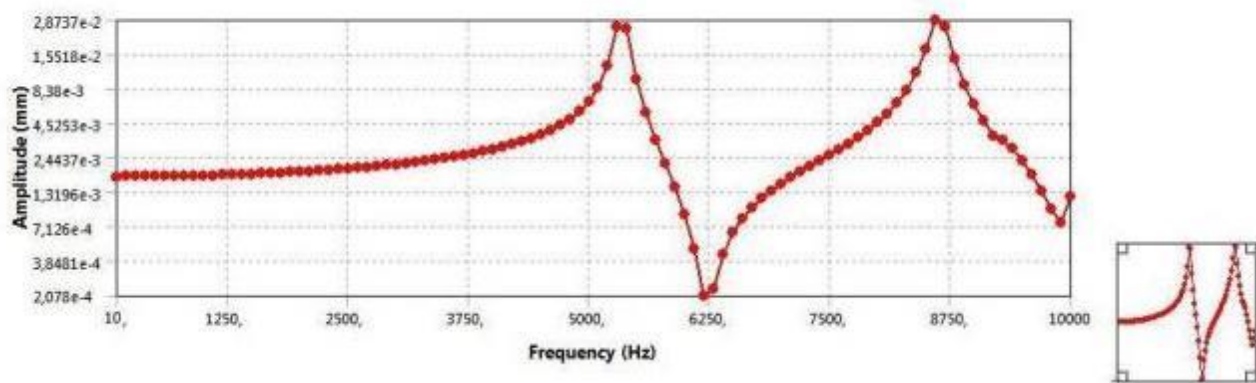
(матеріал важеля – сталь 40ХН)

Frequency Response



a)

Frequency Response



б)

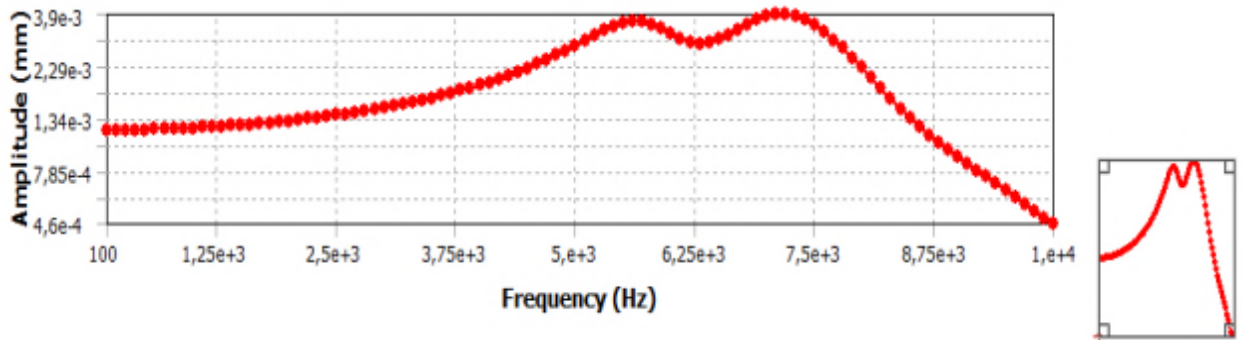
Рисунок 3.14 – АЧХ при свердлінні бобишки головного отвору для:

а – ВП, складеного з елементів комплекту УЗП;

б – ВП, складеного з елементів системи УЗПП

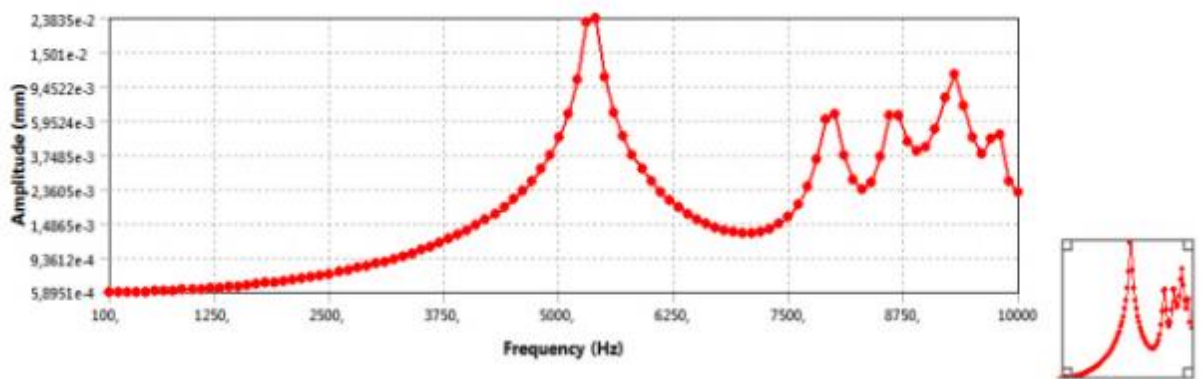
(матеріал важеля – сталь 40ХН)

Frequency Response



а)

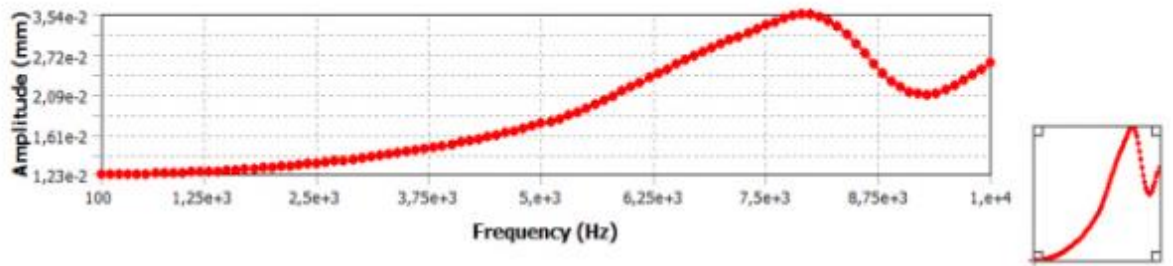
Frequency Response



б)

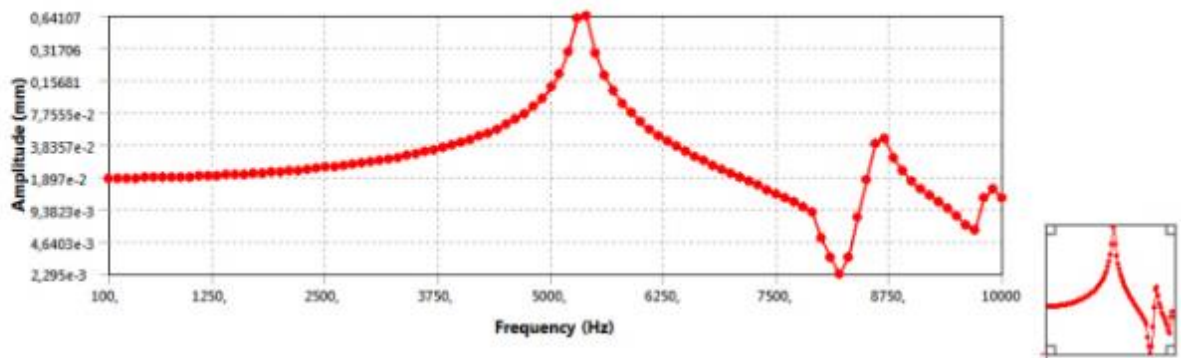
Рисунок 3.15 – АЧХ при фрезеруванні бобишки допоміжного отвору,
що паралельний головному для: а – спеціального ВІ;
б – ВІ, складеного з елементів системи УЗПП
(матеріал важеля – сталь 40ХН)

Frequency Response



а)

Frequency Response



б)

Рисунок 3.16 – АЧХ при свердлінні бобишки допоміжного отвору,
що паралельний головному для: а – спеціального ВП;
б – ВП, складеного з елементів системи УЗПП
(матеріал важеля – сталь 40ХН)

Таблиця 3.16 – Результати розрахунку динамічної жорсткості ВП

Технологічний перехід	Матеріал важеля	Амплітуда динамічної складової сили різання, Н	Максимальна амплітуда переміщення точки, мкм		Розрахунок ва динамічна жорсткість, 10^7 Н/мм		Збільшення жорсткості, рази
			Типовий ТП	Запропонований ТП	Типовий ТП	Запропонований ТП	
Свердління головного отвору	40ХН	1099	24	1,7	0,46	6,46	14,1
	СЧ20	704	20	1,2	0,35	5,87	16,6
	АС9	597	21	1,2	0,28	4,98	17,5
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	40ХН	993	12	11,5	0,83	0,86	1,04
	СЧ20	650	11	9,4	0,59	0,69	1,17
	АС9	520	12	11,4	0,43	0,46	1,05
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному	40ХН	705	16	15,3	0,44	0,46	1,05
	СЧ20	597	18	17,9	0,33	0,33	1,02
	АС9	463	15	14,5	0,31	0,32	1,04

3.4 Висновки

1. Запропоновано алгоритм оптимізації конструкції ВП, де цільовою функцією є зниження металомісткості. За запропонованим алгоритмом встановлено оптимальні параметри елементів розробленої конструкції ВП.

2. Визначено максимальні величини переміщень та напружень у ВП порівнюваних ТП, та за отриманими результатами доведено можливість обробки важеля у ВП запропонованої конструкції.

3. Визначені коефіцієнти моделі, яка охоплює ВП для обробки двоплечих важелів на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах.

4. Визначені власні частоти коливань ВП та встановлено, що при даних режимах обробки резонанс не виникне.

5. Визначені амплітуди коливань, що виникають при механічній обробці заготовки та встановлено, що динамічна жорсткість ВП з елементів системи УЗПП вища ніж ВП складеного з елементів системи УЗП та спеціального ВП у 1,05 та 15 разів відповідно.

4 МЕТОДИКА, АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМА АДАПТУВАННЯ СТАНДАРТНИХ КЕРУЮЧИХ ПРОГРАМ ДЛЯ ЧПК ПІД КОНКРЕТНІ ВИРОБНИЧІ УМОВИ

4.1 Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану різального інструменту під змінні непереточувані пластини

У підрозділі 3.2 за результатами оптимізаційного аналізу розроблено конструкторсько-технологічну документацію для запропонованого ВП, за якою виготовлено дослідний зразок запропонованого ВП для виконання досліджень НДС, визначення частот власних коливань та виконання механічної обробки деталі «Важіль». Також для проведення експериментальної частини досліджень розроблено та виготовлено ВП спеціальної конструкції (рис. 4.1), який складається з плити 1, оправки 2 Ø15g6, що відповідає номінальному розміру отвору центральної бобишки важеля, двох опор 3, та упора 4.

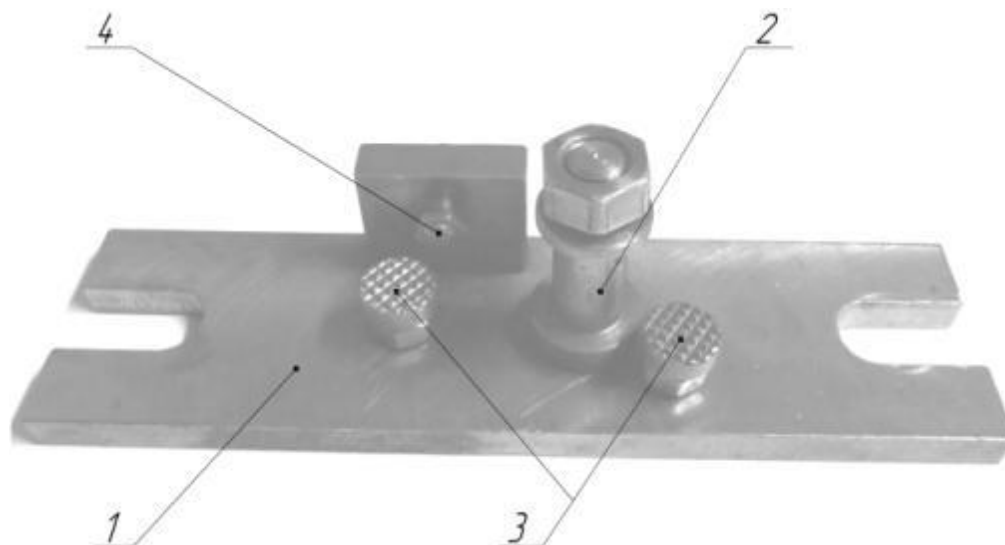


Рисунок 4.1 – Дослідний зразок спеціального ВП
для обробки деталей типу важелів

Для перевірки адекватності результатів моделювання, шляхом співставлення їх з результатами натурних експериментів виконано експериментальні дослідження НДС запропонованого та спеціального ВП типового ТП.

Експериментальні дослідження НДС ВП передбачає прикладання навантажень до місць оброблюваних поверхонь деталі та вимірювання величини переміщень у точці прикладання навантаження. Для цього на базі матеріально-технічного забезпечення кафедри розроблено експериментальну установку з вимірювання величини переміщень під дією навантаження. Принципова схема вимірювання сил та переміщень представлена на рис. 4.2, а схеми вимірювання переміщень у вертикальній та горизонтальній площинах на рис. 4.3 та 4.4 відповідно.

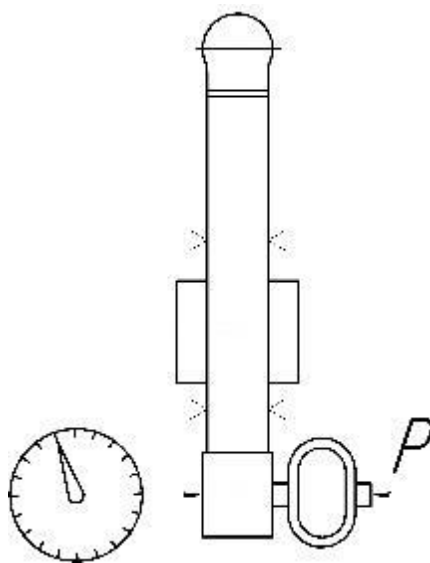
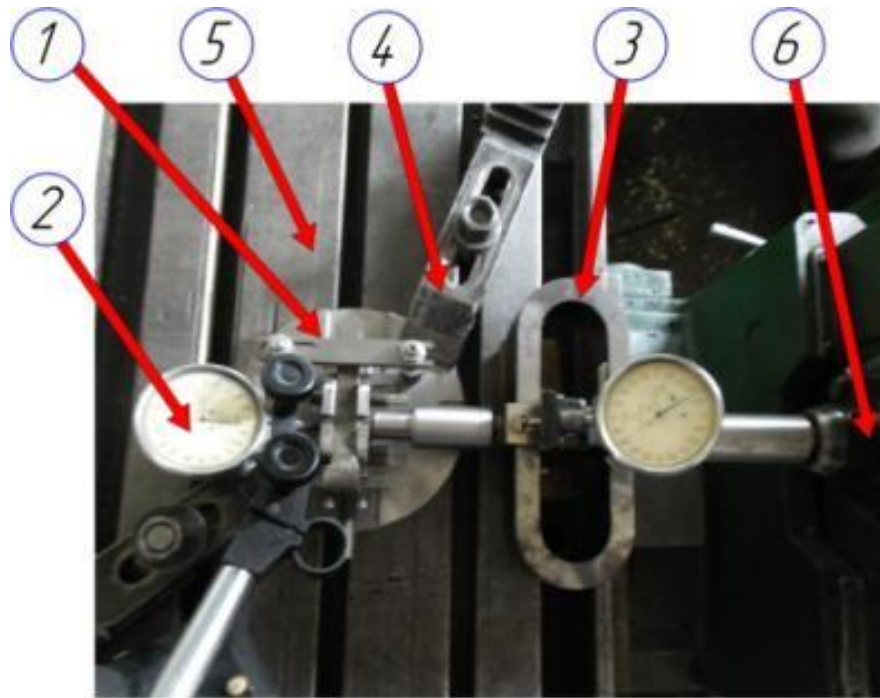


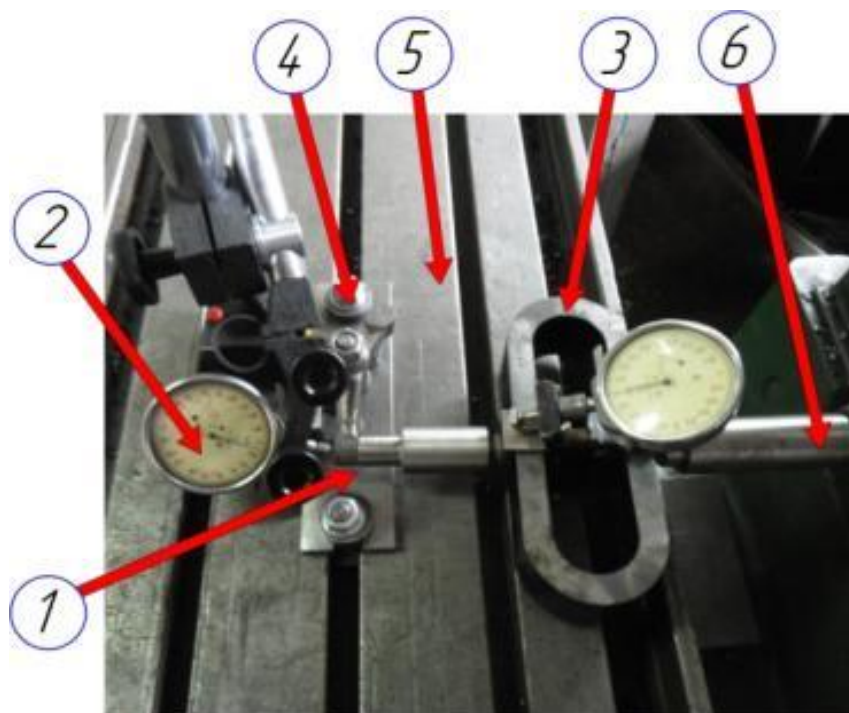
Рисунок 4.2 – Принципова схема дослідження напружено-деформованого стану

Відповідно до схем вимірювання переміщень за базову частину установки було використано горизонтально-фрезерний верстат моделі 6P83 та вертикально фрезерний верстат моделі 6P12. На експериментальних установках (рис. 4.3, 4.4) закріплення ВП 1 на столі верстата 5 виконувалось за допомогою кріпильних елементів 4. Сили прикладались через оправку 6, встановлену у шпинделі верстата, що під час переміщення стола діє на тарований динамометр 3 моделі Mohr & FEDERHAFF MANNHEIM. Динамометр представляє собою таровану пружинну скобу, жорсткість якої відома. Величина сили вимірюється за допомогою визначення величини деформації пружинної скоби, що фіксується

індикатором годинникового типу моделі МІГ1 ГОСТ 9696-82. Ціна поділки індикатора 0,001 мм відповідає величині сили 6 Н.

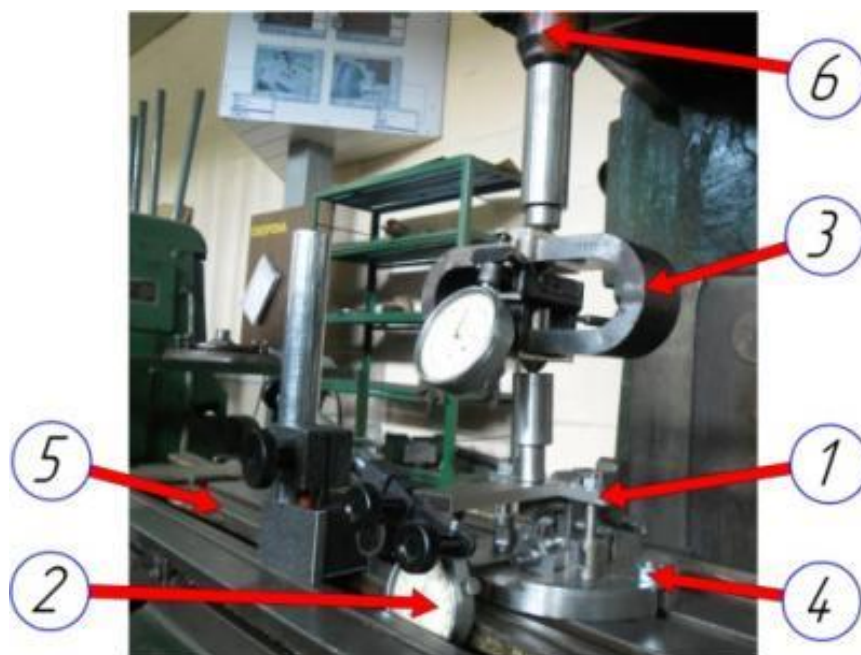


а)



б)

Рисунок 4.3 – Установка для вимірювання сил та переміщень у горизонтальній площині для ВП: а – запропонованого; б – спеціального



а)



б)

Рисунок 4.4 – Установка для вимірювання сил та переміщень у вертикальній площині для ВП: а – запропонованого; б – спеціального

Вимірювання величини переміщень елементів ВП здійснювалось за допомогою індикатора 2 моделі МІГ1 ГОСТ 9696-82. Розрахункові величини навантажень були взяті для обробки важеля зі сталі 40ХН ГОСТ 4543-71, як найбільші, що можуть зустрітись при обробці. При обробці чавуна СЧ20 та

алюмінієвого сплаву АС9 навантаження, що виникатимуть при обробці, будуть суттєво меншими у силу фізико-механічних властивостей даних матеріалів, тому і перевірка НДС для даних умов не виконувалась.

Навантаження на оброблювані поверхні важеля у ВП виконувалось у кількості 10 разів на кожному з поверхонь. При цьому у проміжки між навантаженнями відбувалось повне розвантаження, що імітує процес установлення іншої заготовки. У якості заготовок дослідного зразка для виконання натурального експерименту були взяті виливки з чавуну СЧ20 ГОСТ 1412-85. Процес навантаження, що імітує свердління допоміжних отворів бобишок важеля супроводжується консольними навантаженнями (рис. 4.5), що може призвести до перевищення допустимої величини напружень для чавуна при прикладенні сил, що виникають при обробці сталі 40ХН. Тому величини навантажень для цих переходів обробки були взяті, як розрахункові для чавуна.

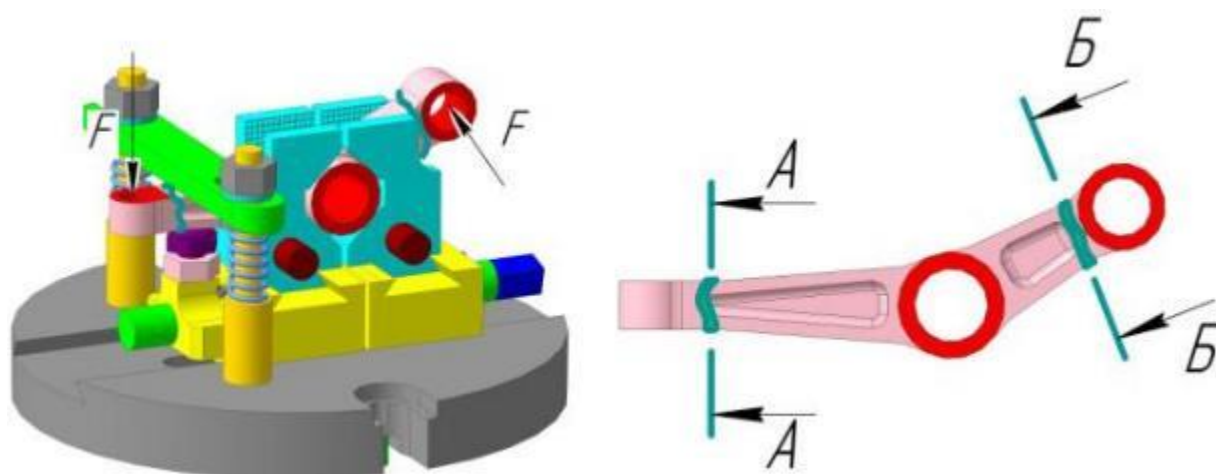


Рисунок 4.5 – Небезпечні перетини у конструкціях важелів при встановленні у ВП

Співставлення експериментальних даних та результатів моделювання для запропонованого та спеціального ВП на найбільш навантажених переходах представлені на графіках (рис. 4.6 – 4.8).

Результати статичного експерименту НДС показали, що величини переміщень елементів ВП більші у середньому на 15% ніж значення величин на

аналогічних переходах при моделюванні, проте все одно знаходяться в допустимих межах.

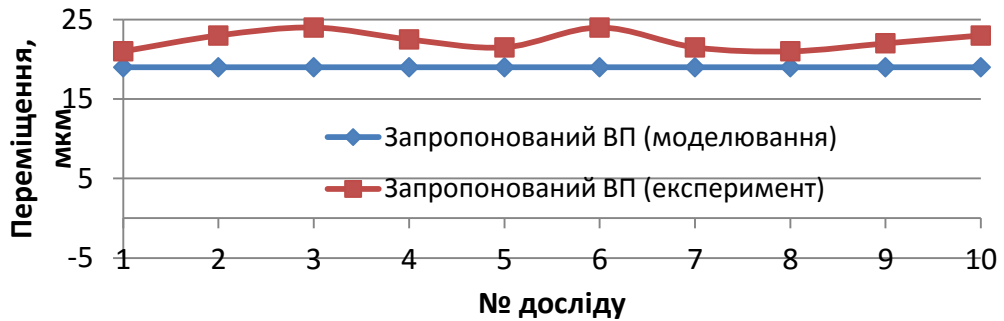


Рисунок 4.6 – Співставлення результатів моделювання та експериментальних даних при свердлінні головного отвору у запропонованому ВП ($P_0 = 5500$ Н, матеріал важеля сталь 40ХН)

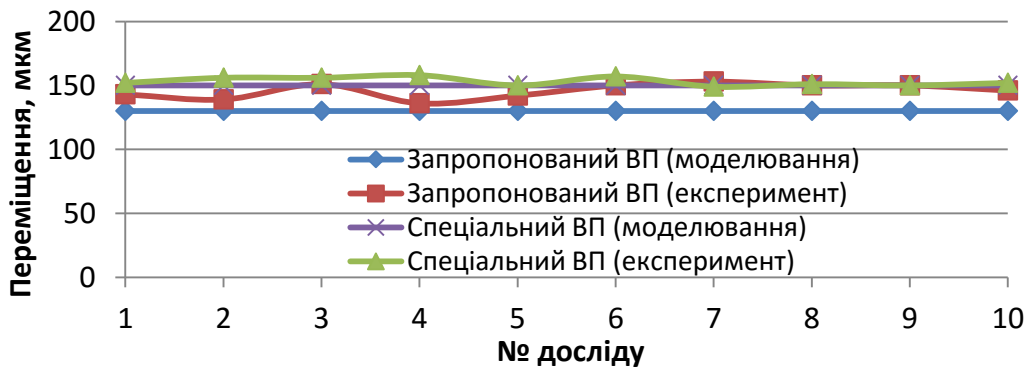


Рисунок 4.7 – Співставлення результатів моделювання та експериментальних даних при свердлінні бобишки допоміжного отвору, що паралельний головному у запропонованому та спеціальному ВП ($P_0 = 3300$ Н, матеріал важеля чавун СЧ20)

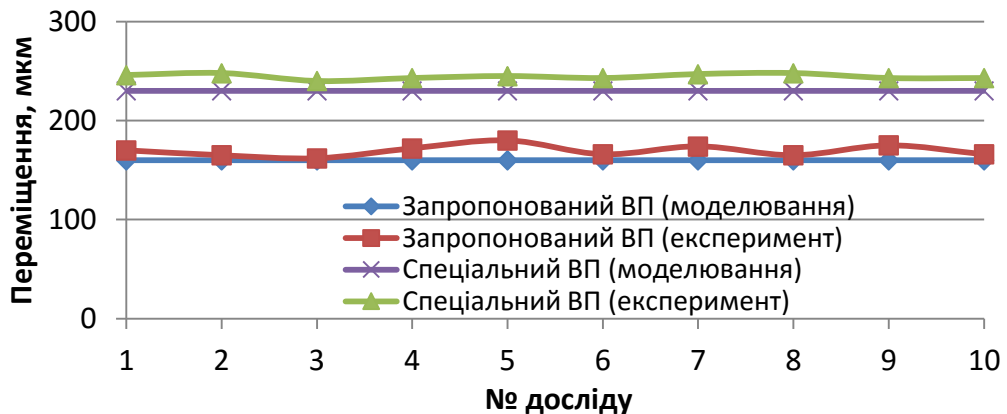


Рисунок 4.8 – Співставлення результатів моделювання та експериментальних даних при свердлінні бобишки допоміжного отвору, що перпендикулярний головному у запропонованому та спеціальному ВП ($P_0 = 2400$ Н, матеріал важеля чавун СЧ20)

Наявність розбіжності між результатами можна пояснити похибками вимірювання величини сили та переміщень, а також реальними властивостями матеріалу деталей ВП, що можуть відрізнятись від довідникових у допустимих межах. При цьому аналогічна ситуація спостерігається і для спеціального ВП типового ТП.

Варто відмітити, що похибка зростає з підвищенням навантаження на елементи як у запропонованому ВП, так і у спеціальному ВП. Отже, виходячи з вищесказаного можна стверджувати, що моделі та граничні умови були задані вірно, тому є сенс провести натурні експерименти із визначення частот власних коливань ВП [114].

4.2 Експериментальні дослідження частот власних коливань різального інструменту під змінні непереточувані пластини

Як відомо, процеси механічної обробки дуже часто супроводжуються коливаннями, тому важливо визначити та попередити можливу їх появу. Це можна виконати, якщо знати частоти власних коливань системи. Кожна система має нескінченну множину частот власних коливань та їх форм (мод), але, як правило, у більшості випадків для конструкцій загального машинобудування та ВП зокрема необхідно знати три перші частоти. Форми коливань можуть мати або не мати періодичності, проте кожна неперіодична форма може бути розкладена на безліч періодичних. Коливання характеризуються частотою та періодом, але з точки зору забезпечення працездатності конструкції та попередження появи резонансу необхідно знати саме частоти власних коливань досліджуваної конструкції. Були визначені частоти власних коливань та порівняні з частотою процесу різання, але для впевненості необхідно провести експериментальні дослідження по визначенню частоти власних коливань для запропонованого та спеціального ВП та порівняти їх з результатами моделювання.

Експериментальний модальний аналіз ВП прогресивного та типового ТП виконувався за схемами установлення (рис. 4.9, 4.10).

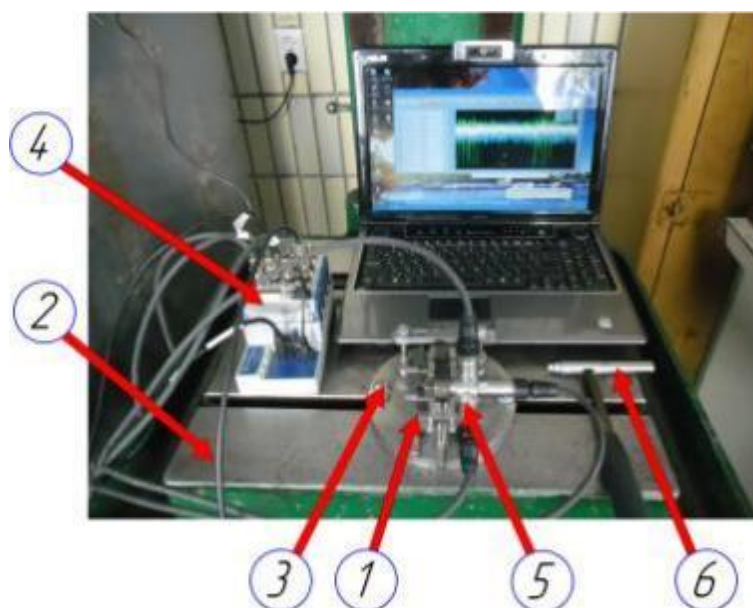


Рисунок 4.9 – Експериментальна установка для виконання модального аналізу для запропонованого ВП

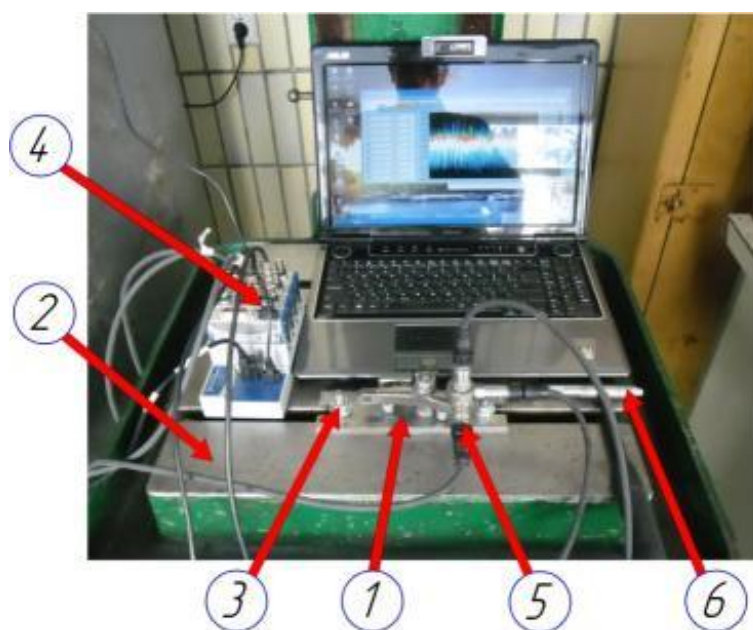


Рисунок 4.10 – Експериментальна установка для виконання модального аналізу для спеціального ВП

Для експериментального визначення власних частот коливань використано обладнання фірми National Instruments. Обидві установки містять конструкцію ВП

(запропонованого або спеціального) 1, що встановлена на столі верстата 2 та закріплена гайками 3, а також пристрою для реєстрації частот коливань 4 за допомогою датчиків 5. ВП жорстко закріплювались на столі верстата задля уникнення побічних коливань, що можуть бути зафіксовані датчиками та внести похибку при експерименті. Масивна конструкція станини верстата буде гасити можливі зовнішні коливання. Для збудження коливань у системі «ВП – заготовка» використовується спеціальний молоток з резиновим наконечником. Початковий імпульс надається шляхом удару молотком по консольним елементам системи «ВП – заготовка». У даному випадку удари наносились по бобишкам головного та допоміжного отворів.

У результаті експериментів отримані миттєві значення віброприскорень, що зафіксовані датчиками через визначені проміжки часу (0,001 секунди). Тому для визначення експериментальних частот власних коливань ВП необхідно визначити спектри частот власних коливань, що можна здійснити за допомогою розкладення отриманих експериментальних значень віброприскорень у вібропереміщення. Ця процедура можлива шляхом подвійного інтегрування функції віброприскорення у вібропереміщення за допомогою використання методу «швидкого перетворення Фур'є». Таким чином, виконавши подвійне інтегрування за допомогою програмного продукту MathCAD були отримані спектри частот власних коливань, що для наочності наведено у вигляді графіка (рис. 4.11). Таким чином піки на графіку відповідають критичним частотам.

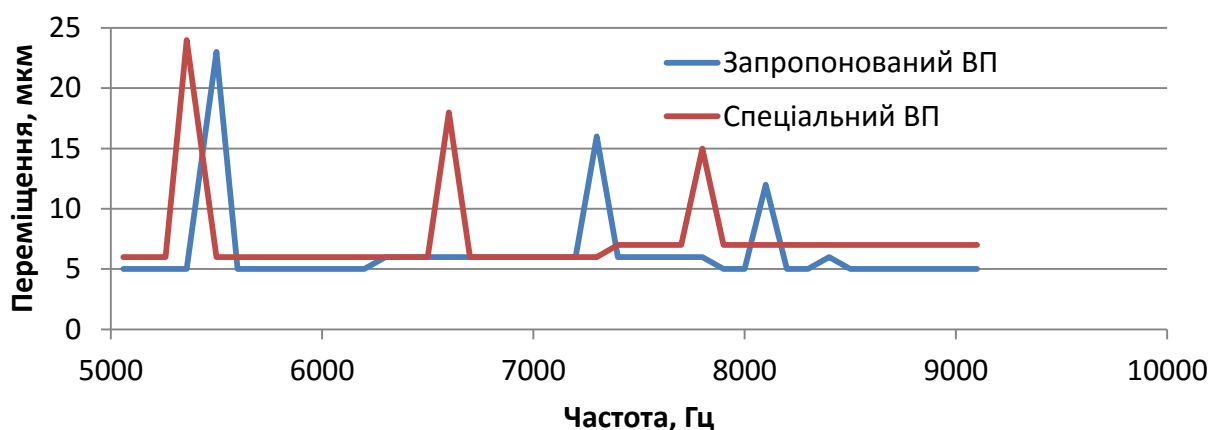


Рисунок 4.11 – Спектри власних частот коливань ВП

Аналізуючи графік, можна зробити висновок, що критичні частоти для запропонованої конструкції ВП вище, ніж для спеціального ВП, а отже, жорсткість запропонованого ВП очікувано буде вищою. Явище резонансу при обробці важеля в обох конструкціях не виникне, адже максимальна частота процесу різання не досягає першої критичної частоти ВП. У результаті експериментів визначені перші критичні величини частот власних коливань: запропонованого ВП – 5516 Гц; спеціального ВП – 5417 Гц. Співставлення теоретичних та експериментальних досліджень власних частот коливань ВП наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Співставлення результатів теоретичних та експериментальних досліджень власних частот коливань ВП

Верстатний пристрій	Критичні частоти, Гц (результати моделювання)			Критичні частоти, Гц (результати експерименту)			Похибка, %		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Спеціальний	5888	7268	8250	5417	6578	7766	9	9,5	5,9
Запропонований	5970	7830	8915	5516	7290	8250	7,6	6,9	9,2

При порівнянні результатів (табл. 4.1) встановлено, що значення частот власних коливань, отриманих експериментальним шляхом, менші ніж при моделюванні на 8%, що при співставленні з результатами НДС є закономірним у зв'язку з реальними умовами та неточностями виготовлення ВП.

Хоча реальні значення переміщень більші, а величини частот власних коливань менші, ніж при моделюванні, вони все одно не перевищують допуски на обробку та резонансні частоти відповідно, отже, можна гарантувати отримання оброблених деталей у межах допусків згідно креслення.

4.3 Виконання експериментальних досліджень механічної обробки та оцінювання точності обробки корпусу різального інструменту під змінні не переточувані пластини

Для перевірки результатів усіх виконаних у науково-дослідній роботі досліджень та розроблення рекомендацій з впровадження запропонованого гнучкого ВП у виробництво виконано обробку важелів у запропонованому та спеціальному ВП.

Заготовками для виконання натурного експерименту були взяті виливки з чавуну марки СЧ20 ГОСТ 1412-85. Динамічний експеримент з обробки важеля виконувався на 5-ти координатному обробному центрі вертикального компоновання моделі DECKEL MAHO DMU 50V з наступними технічними характеристиками (табл. 4.2).

Для можливості доступу до усіх поверхонь важеля без ризику зіткнень рухомих елементів верстата та ВП запропонований ВП був додатково установлений у трикулачковому патроні 7100-0032 ГОСТ 2675-80 (рис. 4.12).

Варто відмітити, що при встановленні запропонованого ВП у патрон відбувалась його попередня вивірка щодо осі обертання стола, та для досягнення співвісності патрона з основою ВП застосовувалось усунення похибок биття кулачків, шляхом їх оброблення у закріпленому патроні на столі верстата. При настроюванні пробна заготовка установлювалась симетрично осі ВП у вертикальній та горизонтальній площинах у межах 0,5 мм за вимогами креслення. У подальшому інші заготовки встановлювались без вивірки. Спеціальний ВП встановлювався безпосередньо на столі верстата (рис. 4.13).

Встановлення заготовок у спеціальному ВП відбувалось шляхом їх базування на оправці. При цьому центральний отвір був попередньо оброблений до розмірів згідно креслення і максимальний зазор у парі «оправка – деталь» складав 30 мкм, що менше допусків на міжцентрові відстані.

Обробка заготовок у запропонованому та спеціальному ВП виконувалась з розрахованими по довідникам та визначеними за каталогами режимами різання

(табл. 4.3), за якими і задавались навантаження при моделюванні. Оскільки матеріал заготовок – чавун марки СЧ20 ГОСТ 1412-85, то змащувально-охолоджуючі рідини (ЗОР) не застосовувались.

Таблиця 4.2 – Технічна характеристика верстата моделі DECKEL MAHO DMU 50V

Параметр	Величина
Розміри робочої поверхні столу, мм:	
- ширина	500
- довжина	500
Найбільше переміщення стола/шпинделя:	
- по осі X, мм	800
- по осі Y, мм	280
- по осі Z, мм	420
- по осі A, °	360
- по осі B, °	360
Частота обертання шпинделя, об/хв	1 – 14000
Подача стола/шпинделя:	
- по осям X, Y, Z, мм/хв	б/с
- по осям A, B, об/хв	б/с
Внутрішній конус шпинделя	SK 40
Габаритні розміри, мм:	
- довжина	2305
- ширина	1950
- висота	2020
Маса, кг	3120
Потужність головного приводу, кВт	7,5



Рисунок 4.12 – Схема установки запропанованого ВП на верстаті при обробці бобишки допоміжного отвору важеля, що перпендикулярний головному

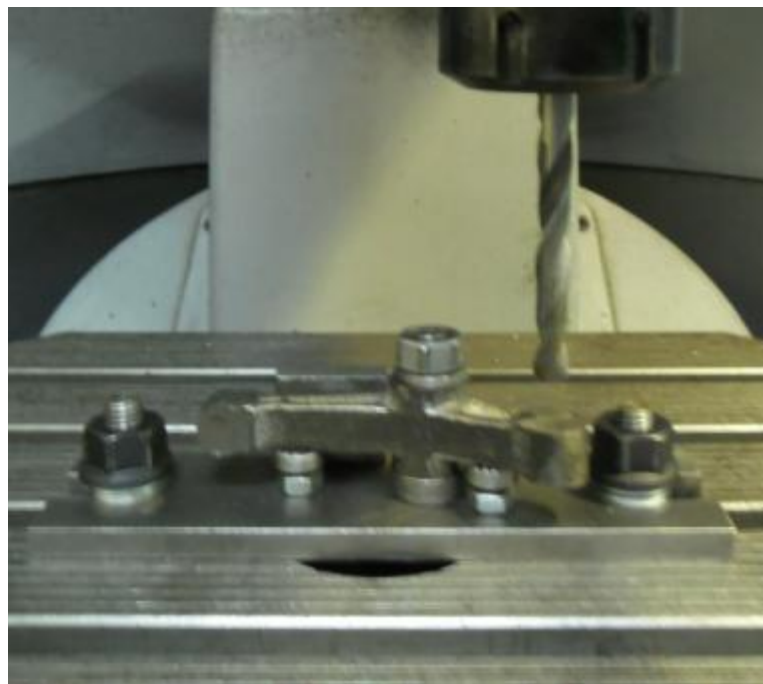


Рисунок 4.13 – Схема установки спеціального ВП на верстаті при обробці бобишки допоміжного отвору важеля, що паралельний головному

Таблиця 4.3 – Режими різання на переходах механічної обробки важеля (матеріал СЧ20 ГОСТ 1412-85)

Перехід	Різальний інструмент (матеріал)	Глибина різання t , мм	Подача S_0 , мм/об	Швидкість різання V м/хв
Фрезерування торця бобишки головного отвору	Фреза кінцева Ø20 (WC)	1	0,88	83
Свердління головного отвору	Свердло спіральне (P6M5)	7,3	0,45	30
Розточування головного отвору	Різець (BK8)	0,15	0,07	100
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	Фреза кінцева Ø20 (WC)	1	0,88	83
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	Свердло спіральне (P6M5)	5,85	0,4	30
Розгорткування допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	Розгортка (P6M5)	0,15	1,6	11
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному	Фреза кінцева Ø20 (WC)	1	0,88	83
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному	Свердло спіральне (P6M5)	4,85	0,38	30
Розгорткування допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	Розгортка (P6M5)	0,15	1,6	11

Під час обробки на кожному з переходів вібрацій та інших непередбачуваних явищ не виникало. Досягнення точності лінійних розмірів здійснено за рахунок корекції інструмента після першого проходу при обробці першої заготовки. У подальшому корегування не проводились. Усього за час проведення експерименту оброблено 100 важелів (по 50 у кожному ВП).

Оброблені важелі пройшли перевірку точності, тобто оцінку відповідності розмірів оброблених деталей у ВП вимогам креслення. Вимірювання розмірів та взаємного розташування поверхонь виконувались на координатно-вимірювальній машині моделі 3D CNC SMS Thome Prazision Rapid (рис. 4.14–4.16).



Рисунок 4.14 – Вимірювання розмірів бобишки головного отвору



Рисунок 4.15 – Вимірювання розмірів бобишки допоміжного отвору, що паралельний головному



Рисунок 4.16 – Вимірювання розмірів бобишки допоміжного отвору, що перпендикулярний головному

Також визначені міжцентрові відстані та лінійні розміри для партії деталей $N = 20$ шт. Протоколи вимірювань усіх розмірів оброблених деталей у запропонованому та спеціальному ВП зведені у табл. 4.4. У протоколи занесені результати вимірювань 2-ї, 11-ї та 20-ї деталей для кожного ВП. На першій деталі для кожного ВП виконувалось налагодження процесу обробки, тому дані деталі не брались до уваги. Розміри деталей та граничні відхилення взяті з креслення деталі «Важіль».

Усі розміри деталей, що були оброблені у запропонованому ВП, знаходяться в межах допусків, що задані на кресленні, а саме розміри отворів, міжцентрові відстані та взаємне розташування поверхонь деталі «Важіль». Максимальне відхилення міжцентрових відстаней від номінальних значень склало 0,03 мм для запропонованого ВП, а для спеціального ВП – 0,05 мм, що можна пояснити наявністю вищевказаного зазору.

Вимірювання шорсткості виконувалось на універсальному профілометрі моделі Mitutoyo SJ-400. За даними лабораторних вимірювань (табл. 4.5), шорсткість оброблених поверхонь важелів, знаходиться у межах 1,33...1,54 мкм за критерієм R_a , що є допустимим відповідно до вимог креслення. Проте на заготовках, де мають місце наявність раковин та ливарних пор, в окремих місцях шорсткість досягає 4,1...4,3 мкм за критерієм R_a .

Таблиця 4.4 – Протокол вимірювання розмірів деталі «Важіль»

Розмір	Дослідні зразки важелів, оброблені у запропонованому ВП			Дослідні зразки важелів, оброблені у спеціальному ВП		
	№2	№11	№20	№2	№11	№20
Ø15H7 ^{+0,018}	15,015	15,014	15,015	–	–	–
Ø12H9 ^{+0,043}	12,012	12,012	12,011	12,012	12,011	12,011
Ø10H9 ^{+0,036}	10,011	10,011	10,011	10,011	10,011	10,011
26,5h12 _{-0,21}	26,428	26,425	26,421	26,422	26,421	26,427
15h12 _{-0,18}	14,991	14,995	14,992	14,988	14,988	14,988
10h12 _{-0,15}	9,994	9,997	9,996	9,881	9,903	9,908
60±0,05	60,031	60,024	60,027	60,041	60,049	60,032
40±0,05	40,005	40,005	40,008	40,046	40,037	40,028

Таблиця 4.5 – Протокол вимірювання шорсткості поверхонь деталі «Важіль»

Розмір	Шорсткість поверхонь дослідних зразків важелів, оброблених у запропонованому ВП			Шорсткість поверхонь дослідних зразків важелів, оброблених у спеціальному ВП		
	№2	№11	№20	№2	№11	№20
Ø15H7 ^{+0,018}	1,42	4,1	1,51	–	–	–
Ø12H9 ^{+0,043}	1,47	1,39	4,12	1,41	1,51	4,28
Ø10H9 ^{+0,036}	1,45	1,49	1,41	1,33	1,36	1,35
26,5h12 _{-0,21}	1,48	1,45	1,54	1,42	1,48	1,52
15h12 _{-0,18}	1,45	1,49	1,51	1,52	1,38	1,46
10h12 _{-0,15}	1,44	1,47	1,53	1,49	1,51	1,38

Збільшення шорсткості можна пояснити нестационарними умовами різання, тобто нерівномірністю розподілення припуску, а також неминучим виникненням вібрацій на переривчастих поверхнях. Як видно з табличних даних, ця тенденція є справедливою як для запропонованого, так і для спеціального ВП.

Фактичні значення відхилень від номінального розміру головного отвору, відхилення від перпендикулярності допоміжного отвору $\varnothing 10H9$ відносно головного $\varnothing 15H7$ та фактичні значення шорсткості головного отвору для дослідної партії важелів наведені на рис. 4.17–4.19 відповідно.

Отже за результатами контролю можна однозначно говорити, що запропонований ВП не поступається спеціальному в жодному компоненті за критерієм розмірної точності деталей, що оброблені у ньому та шорсткості поверхонь. Як видно з табл. 4.4, точність взаємного розташування поверхонь у запропонованому ВП вища, ніж у спеціальному, що насамперед досягається за рахунок виконання механічної обробки за один установ.

Проте, доцільність використання запропонованого ВП у виробничих умовах може бути оцінена лише за допомогою економічних розрахунків за даними типового та запропонованого ТП обробки деталі «Важіль».

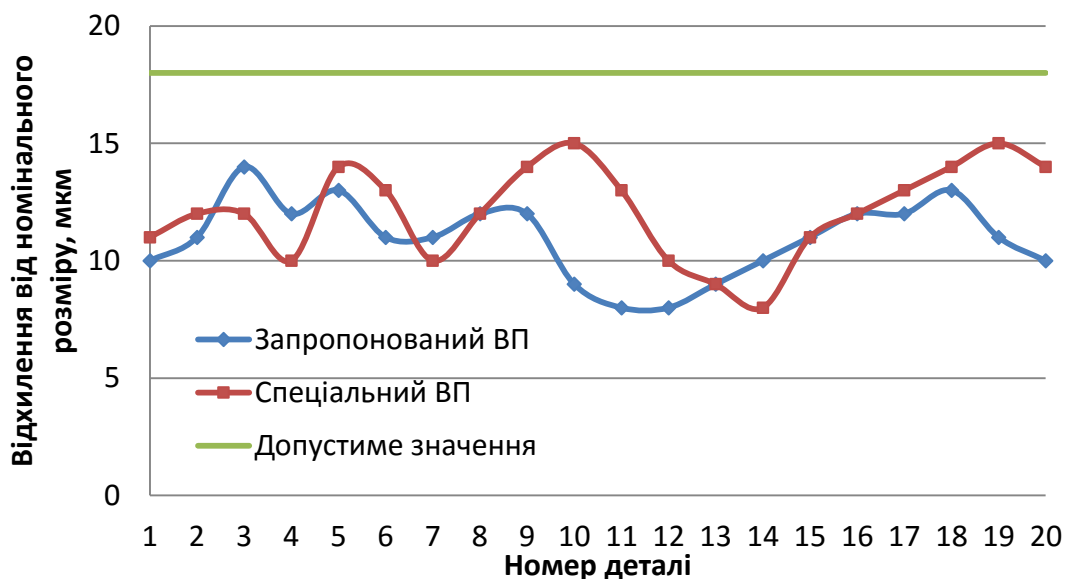


Рисунок 4.17 – Фактичні відхилення розміру головного отвору від номінального значення

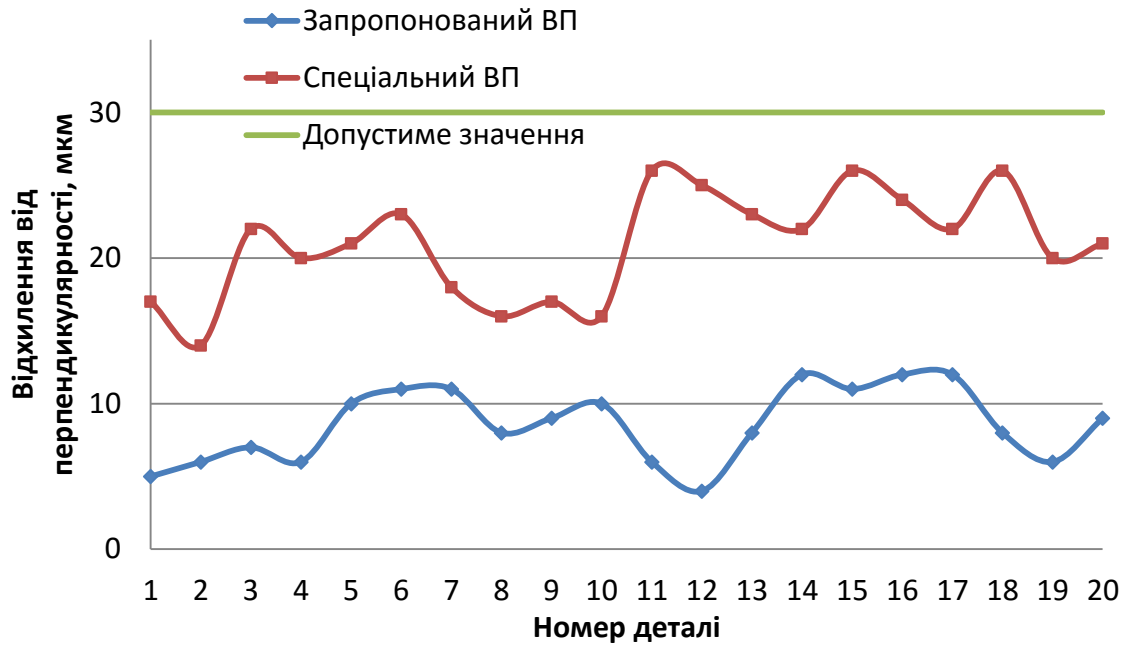


Рисунок 4.18 – Фактичні відхилення від перпендикулярності допоміжного отвору $\varnothing 10H9$ відносно головного $\varnothing 15H7$

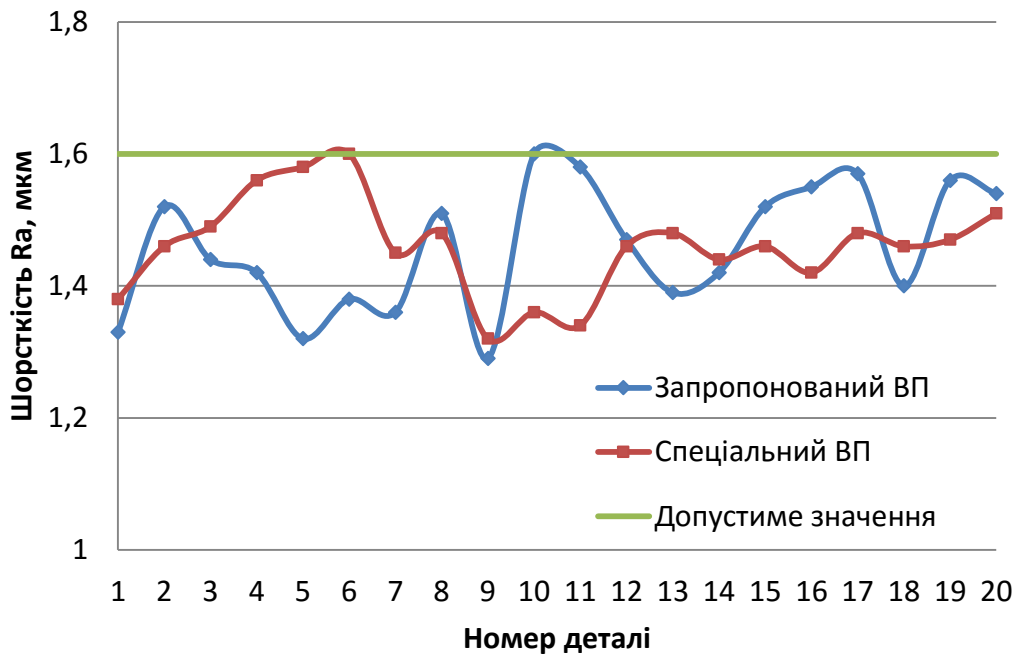


Рисунок 4.19 – Фактична шорсткість поверхні головного отвору

4.4 Висновки

1. Виконано експериментальні дослідження НДС системи «ВП – заготовка» які показали, що величини переміщень елементів ВП більші у середньому на 15% ніж значення величин на аналогічних переходах при моделюванні. Проте значення реальних переміщень також не виходять за величину допусків, що задані на кресленні.

2. Виконані експериментальні дослідження частот власних коливань системи «ВП – заготовка» показали зменшення власних частот реальних конструкцій ВП запропонованого та спеціального ВП на 8% порівняно з результатами моделювання. Реальні частоти власних коливань перевищують режими обробки, отже резонанс не виникне.

3. Виконані дослідження точності механічної обробки важелів у двох системах ВП показали, що усі розміри оброблених деталей знаходяться у межах допусків на обробку, проте точність відносного розміщення поверхонь деталі, що оброблена у запропонованому ВП вища у середньому на 0,02 мм, що пояснюється відсутністю похибки установаження у запропонованому ВП. Шорсткість поверхонь оброблених важелів також знаходиться у межах, що задані кресленням.

4. Розрахунки річного економічного ефекту показали значне скорочення витрат допоміжного та підготовчо-заключного часу при використанні запропонованого ВП при переналагодженні на інший типорозмір. Річний ефект за укрупненими розрахунками склав 724200 грн. при річному випуску деталей 2000 шт. Собівартість запропонованого ВП на одну деталь склала 1 грн, що на 150% менше, ніж при застосуванні ВП типового ТП.

5 КОМП'ЮТЕРНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОСНАЩЕННЯ

5.1 Комп'ютерна реалізація САПР різального інструменту зі змінними непереточуваними пластинами

Комп'ютерна програма «Database for Fixture Design» надає можливість користувачу здійснювати збереження, пошук та перегляд довідкової інформації щодо забезпечення процесу проектування верстатного пристрою (ВП), а саме про:

- функціональні елементи ВП (опорні, установлювальні, затискні);
- оброблювані матеріали;
- металорізальне обладнання для реалізації свердлильно-фрезерно-розточувальних операцій;
- виробничі та технічні параметри обробки;
- схеми базування заготовок.

До основних особливостей комп'ютерної програми можна віднести наступні:

- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс;
- можливість формування звіту за результатами розрахунків у форматі *.xls.

Комп'ютерна програма «Database for Fixture Design» призначена для експлуатації на IBM-сумісних персональних комп'ютерах. Для використання програми необхідно мати таку апаратну та програмну конфігурацію:

- 32- або 64-розрядний процесор архітектури x86 зі швидкодією не менше 1 ГГц;
- оперативна пам'ять – не менше 512 МБ;
- жорсткий диск із обсягом вільного дискового простору не менше 850 МБ;
- кольоровий графічний дисплей – 16 млн. кольорів, 800x600 або вище;
- принтер (у разі необхідності друку звітів);

- комп'ютерна миша;
- операційна система Microsoft Windows XP або Windows 7.

5.2 Схеми бази даних

Основними функціями розробленої комп'ютерної програми «Database for Fixture Design» є: накопичення, уточнення, вдосконалення, зберігання та надання інформації про функціональні елементи, металорізальне обладнання тощо. Для реалізації цих функцій розроблено базу даних, яка складається з 5 сутностей.

Таблиця elementS містить інформацію про опорні елементи, опис атрибутів яких наводиться у табл. 5.1. Таблиця elementC містить інформацію про затискні елементи, опис атрибутів яких наводиться у табл. 5.2. Таблиця elementL містить інформацію про установлювальні елементи, опис атрибутів яких наводиться у табл. 5.3. Таблиця cuttingEquipment містить інформацію про металорізальне обладнання, опис атрибутів якого наводиться у табл. 5.4. Таблиця material містить інформацію про матеріали, опис атрибутів якого наводиться у табл. 5.5.

Таблиця 5.1 – Атрибути опорного елемента

Атрибут	Тип	Довжина	Опис атрибута
1	2	3	4
id	INT	5	Первинний ключ
shifr	VARCHAR	10	Шифр елемента (відповідно до запропонованої структурної формули)
image	VARCHAR	20	Назва зображення опорного елемента
gabDiameter	DOUBLE	10,0	Діаметр опорного елемента (габаритний розмір)
gabLength	DOUBLE	10,0	Довжина опорного елемента (габаритний розмір)
gabWidth	DOUBLE	10,0	Ширина опорного елемента (габаритний розмір)
gabHeight	DOUBLE	10,0	Висота опорного елемента (габаритний розмір)
surLength	DOUBLE	10,0	Довжина робочої поверхні
surWidth	DOUBLE	10,0	Ширина робочої поверхні
diameter	VARCHAR	5	Діаметр (приєднувальний розмір)
step	INT	4	Крок (приєднувальний розмір)
weight	DOUBLE	10,0	Маса опорного елемента
material	VARCHAR	50	Матеріал опорного елемента
price	DOUBLE	10,0	Вартість опорного елемента

Таблиця 5.2 – Атрибути затискного елемента

Атрибут	Тип	Довжина	Опис атрибута
1	2	3	4
id	INT	5	Первинний ключ
shifr	VARCHAR	10	Шифр елемента (відповідно до запропонованої структурної формули)
image	VARCHAR	20	Назва зображення затискного елемента
length	DOUBLE	10,0	Довжина затискного елемента (габаритний розмір)
width	DOUBLE	10,0	Ширина затискного елемента (габаритний розмір)
height	DOUBLE	10,0	Висота затискного елемента (габаритний розмір)
minDR	INT	10	Мінімум діапазону регулювання
maxDR	INT	10	Максимум діапазону регулювання
force	DOUBLE	10,0	Сила закріплення
forceH	DOUBLE	10,0	Сила закріплення у горизонтальному напрямку
forceV	DOUBLE	10,0	Сила закріплення у вертикальному напрямку
weight	DOUBLE	10,0	Маса затискного елемента
material	VARCHAR	50	Матеріал затискного елемента
fixingScheme	VARCHAR	50	Схема закріплення затискного елемента
price	DOUBLE	10,0	Вартість затискного елемента

Таблиця 5.3 – Атрибути установлювального елемента

Атрибут	Тип	Довжина	Опис атрибута
1	2	3	4
id	INT	5	Первинний ключ
shifr	VARCHAR	10	Шифр елемента (відповідно до запропонованої структурної формули)
image	VARCHAR	20	Назва зображення установлювального елемента
gabLength	DOUBLE	10,0	Довжина установлювального елемента (габаритний розмір)
gabWidth	DOUBLE	10,0	Ширина установлювального елемента (габаритний розмір)
gabHeight	DOUBLE	10,0	Висота установлювального елемента (габаритний розмір)
surLength	INT	10	Довжина робочої поверхні
surWidth	INT	10	Ширина робочої поверхні
diameter	DOUBLE	10,0	Діаметр (приєднувальний розмір)
step	DOUBLE	10,0	Крок (приєднувальний розмір)
weight	DOUBLE	10,0	Маса установлювального елемента
material	VARCHAR	50	Матеріал установлювального елемента
changeoverTime	INT	10	Час переналадження
price	DOUBLE	10,0	Вартість установлювального елемента
base	VARCHAR	50	Функціональні поверхні

Таблиця 5.4 – Атрибути металорізального обладнання

Атрибут	Тип	Довжина	Опис атрибута
1	2	3	4
id	INT	11	Первинний ключ
type	VARCHAR	20	Тип
manufacturer	VARCHAR	50	Виробник
country	VARCHAR	10	Країна
model	VARCHAR	10	Модель верстата
length	DOUBLE	10,2	Довжина робочого стола верстата (габаритний розмір)
width	DOUBLE	10,2	Ширина робочого стола верстата (габаритний розмір)
diameter	DOUBLE	10,2	Діаметр робочого стола верстата (габаритний розмір)
minWorkspace	DOUBLE	10,2	Робочий розмір (від кінця шпинделя до поверхні стола)
maxWorkspace	DOUBLE	10,2	Робочий розмір (від кінця шпинделя до поверхні стола)
maxRotationSpeed	DOUBLE	10,2	Максимальна частота обертання шпинделя, об/хв.
maxLoad	DOUBLE	10,2	Максимально допустиме навантаження на робочий стіл верстата (рівномірно розподілене)
power	DOUBLE	10,2	Потужність верстата
accuracy	DOUBLE	10,2	Точність позиціонування супорту
system	VARCHAR	20	Система ЧПК
countOfTools	INT	5	Кількість інструментів
typeOfToolsStore	VARCHAR	20	Тип інструментного магазину
timeTools	DOUBLE	10,0	Час зміни інструмента (від інструмента до інструмента)
timeShavings	DOUBLE	10,0	Час зміни інструмента (від стружки до стружки)
countOfAxes	INT	5	Кількість керованих осей

Таблиця 5.5 – Атрибути матеріалів

Атрибут	Тип	Довжина	Опис атрибута
1	2	3	4
id	INT	5	Первинний ключ
group	VARCHAR	10	Група, до якої належить матеріал
marka	VARCHAR	20	Марка матеріалу
HB	DOUBLE	10,0	Твердість матеріалу

Фрагмент структури розробленої реляційної бази даних представлено на рис. 5.1.

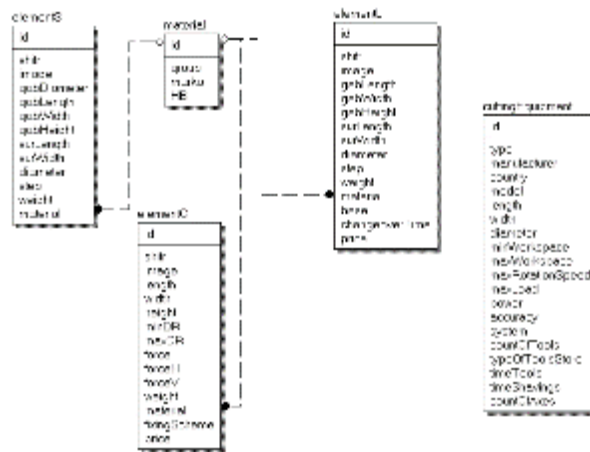


Рисунок 5.1 – Реляційна схема бази даних (фрагмент)

База даних була реалізована в СУБД MySQL. Для забезпечення зручної та коректної роботи користувача з інформацією, яка міститься в базі даних, розроблено комп'ютерну програму «Database for Fixture Design».

Для коректної роботи з базою даних програмними засобами необхідно створити об'єкт типу MySqlConnection (встановлюється додатково та є у вільному доступі) та сформулювати рядок підключення в якому вказується:

- сервер, до якого здійснюється підключення (localhost – в даному випадку локальний сервер);
- логін користувача, який має доступ до бази даних (testuser);
- пароль для доступу до бази даних(1111);
- назва бази даних (Database).

При встановленні з'єднання відбувається перевірка можливості виконання операції, і у випадку, якщо не вдається це зробити, комп'ютерна програма виводить попередження. Фрагмент коду зображено на рис. 5.2.

```

Try
    connection.Open()
    Return True
Catch ex As Exception
    MsgBox("Неможливо відкрити з'єднання")
    connection.Close()
    Return False
End Try

```

Рисунок 5.2 – Приклад коду з попередженням при відкритті з'єднання з базою даних

Обробка інформації виконується спеціальними методами, які містяться в класі Connection (табл. 5.6).

Для організації роботи з інформацією, яка міститься в таблицях бази даних, використано мову структурованих запитів SQL.

Таблиця 5.6 – Методи класу Connection для роботи з базою даних

№ п/п	Метод	Вхідні параметри	Описання
1	createConnection	-	Створюється та відкривається з'єднання з базою даних
2	getRowsByColumn	table – таблиця, з якої отримуються дані; column – колонка результатів запиту, значення якого повинен повернути метод	Повертає набір значень за запитом <code>SELECT ` & column & ` FROM ` & table & `</code> , де параметри table та column є вхідними параметрами методу
3	getRowByKey	query – запит, яким необхідно здійснювати вибірку даних; fields – назви стовпців, значення яких необхідно повернути як результат	Повертає набір значень, вибраних за допомогою запиту, заданого користувачем
4	updateTable	query – запит на виконання	Метод нічого не повертає, лише виконує запит, заданий користувачем як вхідний параметр
8	getSetOfElementsWithKeyAndValue	table – таблиця, з якої здійснюється вибірка; key, value – назви стовпців, значення яких вибирається з таблиці	Повертає дані з бази за допомогою запиту <code>"select ` & key & `, ` & value & ` from ` & table & `"</code> , де table, key, value – вхідні параметри методу
9	getRows	query – запит на вибірку; column – стовпець, значення якого необхідно вибрати з бази	Повертає результати запиту, заданого користувачем

При розробці програмних кодів модуля керування бібліотеками досить часто доводиться виконувати дії з записами таблиць. Для зручності виконання таких дій було прийнято рішення розробити систему класів, які б описували відповідні сутності предметної області.

Наприклад, C – клас, який являє собою контейнер для зберігання інформації про затискний елемент. У таблиці 5.7 наведено опис атрибутів класу, в таблиці 5.8– опис методів класу.

Таблиця 5.7 – Атрибути класу C

Атрибут	Тип	Призначення
1	2	3
fields	String()	Параметри елемента, які співпадають з стовпцями в базі даних
legalFields	String()	Розширена назва атрибутів елемента
id	Integer	Унікальний ідентифікатор елемента
shifr	String	Шифр елемента
image	String	Зображення елемента
length	Double	Довжина елемента
width	Double	Ширина елемента
height	Double	Висота елемента
minDR	Double	Мінімум (діапазон регулювання)
maxDR	Double	Максимум (діапазон регулювання)
force	Double	Сила закріплення в одному напрямку
forceH	Double	Сила закріплення в горизонтальному напрямку
forceV	Double	Сила закріплення у вертикальному напрямку
weight	Double	Маса елемента
material	String	Матеріал елемента
fixingScheme	String	Схема закріплення

Таблиця 5.8 – Окремі методи класу C

Метод	Параметри	Тип значення, що повертає	Призначення
1	2	3	4
setId	id	-	Ініціалізує поле id
getId	-	Integer	Повертає ідентифікатор елемента
setShifr	shifr	-	Ініціалізує поле shifr
getShifr	-	String	Повертає шифр елемента
setImage	image	-	Ініціалізує поле image
getImage	-	String	Повертає назву зображення елемента
setForce	force	-	Ініціалізує поле force
getForce	-	Double	Повертає силу закріплення в одному напрямку
setForceH	forceH	-	Ініціалізує поле forceH
getForceH	-	Double	Повертає силу закріплення горизонтальному напрямку
setForceV	forceV	-	Ініціалізує поле forceV
getForceV	-	Double	Повертає силу закріплення вертикальному напрямку

Продовження табл.5.8

setMaterial	material	-	Ініціалізує поле material
getMaterial	-	String	Повертає матеріал елемента
setFixingScheme	fixingScheme	-	Ініціалізує поле fixingScheme
getFixingScheme	-	String	Повертає схему закріплення

Загальний перелік класів, які використовуються у модулях керування бібліотеками бази даних, та їх призначення наведено в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Розроблені класи та їх призначення

№ п/п	Ідентифікатор класу	Призначення
1	Connection	Клас, який дозволяє працювати з базою даних
2	BaseScheme	Описує сутність предметної області «Схема базування»
3	C	Контейнер для зберігання інформації про затискний елемент
4	S	Контейнер для зберігання інформації про опорний елемент
5	L	Контейнер для зберігання інформації про установлюваний елемент
6	Combinig	Контейнер для зберігання інформації про компонування ВП
7	CuttingEquipment	Контейнер для зберігання інформації про металорізальне обладнання
8	Material	Контейнер для зберігання інформації про матеріал
9	Optimization	Контейнер для здійснення оптимізаційних обчислень

Інтерфейс користувача реалізовано за технологію MDI-інтерфейсу, що забезпечує можливість відкрити відразу кілька бібліотек.

Вікна по роботі з окремими бібліотеками реалізовано у вигляді підпорядкованих форм, які створюються за запитом користувача в рамках контейнера – головної форми. У режимі виконання підпорядковані (дочірні) вікна розміщуються всередині батьківського вікна MDI форми. При закритті форми-контейнера закриваються всі підпорядковані форми.

Взаємодія користувача з комп'ютерною програмою організована за допомогою головного меню. Кожен модуль представлений в системі формою, яка виконує власну функцію:

– MainForm – головна форма програми, яка є батьківською формою для решти форм;

- ElementS – форма для роботи з бібліотекою опорних елементів;
- ElementC – форма для роботи з бібліотекою затискних елементів;
- ElementL – форма для роботи з бібліотекою установлювальних елементів;
- Material – форма для роботи з бібліотекою матеріалів;
- CuttinEquipment – форма для роботи з бібліотекою металорізального обладнання;
- FormLibraryBasingSchemes – форма для відображення інформації з бібліотеки схем базування;
- FormLibraryInformationTechnology,
FormLibraryInformationTechnology2, FormLibraryInformationTechnology3 – форми для відображення інформації з бібліотеки технологічної інформації;
- FormLibraryOfProductionParameters – форма для відображення інформації з бібліотеки виробничих параметрів обробки;
- FormParser – форма, яка дозволяє в автоматизованому режимі імпортувати велику кількість даних з файла формату *.xls в одну з таблиць бази даних.

При проектуванні інтерфейсу користувача використовувалися стандартні для операційної системи Windows компоненти. Такий підхід дозволив створити інтуїтивно зрозумілий інтерфейс.

Для зручності користування у модулях комп'ютерної програми користувачу надано можливість використовувати «гарячі»клавіші клавіатури або їх комбінації для швидкого та зручного виконання певних операцій:

- <Tab> – перехід між полями вікна у звичайному напрямку (від лівого поля до правого, від верхнього до нижнього);
- <Shift + Tab> – перехід між полями вікна у зворотному напрямку.

Також передбачено контроль правильності вводу даних користувачем.

Поля внесення даних у комп'ютерну програму мають різний формат введення даних. У поля, для яких встановлено обмеження на розмір внесених

даних, неможливо внести значення більше, ніж встановлено обмеженням. Якщо обов'язкові для заповнення поля не заповнено або поля містять некоректні дані, в комп'ютерній програмі буде виконана перевірка даних. У результаті, якщо поле не було заповнено, буде відображено повідомлення про помилку (рис. 5.3).

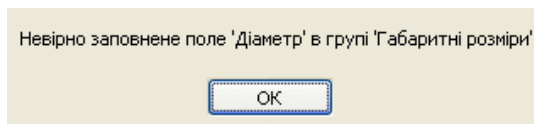



Рисунок 5.3 – Приклад повідомлення при некоректному заповненні поля

Деякі значення у програмі можуть бути заповнені лише за допомогою вибору необхідного значення з довідника. Такі поля мають кнопку  праворуч (рис. 5.4).

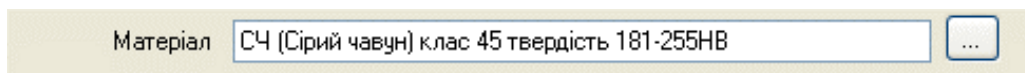



Рисунок 5.4 – Поле для обрання значення з довідника

При натисканні на кнопку  відкривається вікно вибору значення з відповідного довідника.

Довідник не передбачає редагування параметрів, їх вміст змінюється лише розробником при наданні оновлень комп'ютерної програми. Саме тому довідник не містить панелі інструментів із функціями додавання, редагування та видалення записів.

Для полегшення сприйняття інформації та вводу даних вікна комп'ютерної програми поділяються на блоки (групи полів). Блоки містять певні згруповані поля. Наприклад, у вікні «Бібліотека опорних елементів» (рис. 5.5) знаходиться блок «Габаритні розміри, мм», до якого входять поля: «Довжина», «Ширина» та «Висота».

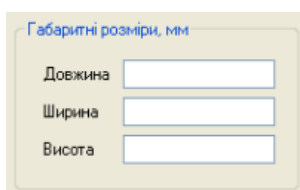


Рисунок 5.5 – Приклад блоку даних

У разі, якщо обов'язкові для заповнення поля не заповнено або поля містять некоректні дані, буде відображено повідомлення про помилку.

5.3 Комп'ютерна реалізація САПР верстатних пристроїв

Запропоновано методикау автоматизованого позиціонування функціональних елементів верстатних пристроїв (ВП) з урахуванням конструктивно-технологічних параметрів оброблюваних поверхонь заготовки. Інтеграція даної методики у систему автоматизованого проектування верстатних пристроїв (САПР ВП) є ефективним рішенням для скорочення витрат часу, пов'язаних із проектуванням ВП для свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів, та підвищення якості компоновань ВП.

Основною вхідною інформацією при позиціонуванні є коди функціональних елементів ВП (установлювальні, затискні, опорні), з яких планується компоувати ВП і параметри функціональних поверхонь заготовки.

Процес просторового позиціонування структурних елементів системи «ВП – заготовка» здійснюється за схемою, наведеною на рис. 5.6.

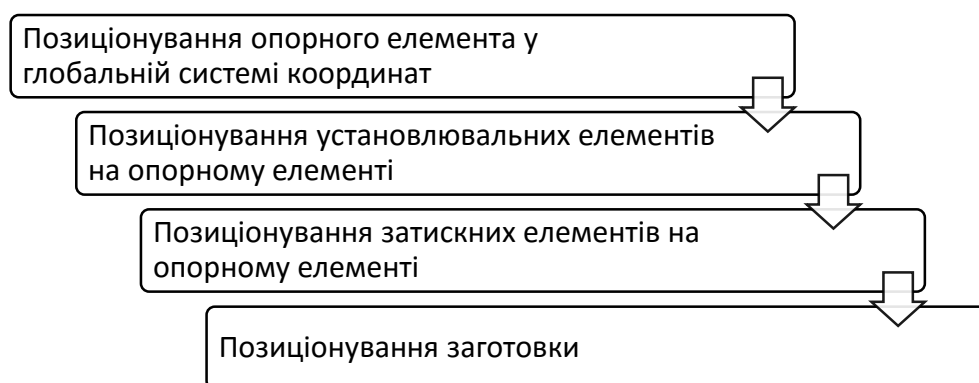


Рисунок 5.6 – Порядок дій при просторовому позиціонуванні структурних елементів системи «ВП – заготовка»

У даній роботі розглянуто типову схему базування за трьома площинами («3-2-1»), яка притаманна для базування корпусних деталей або деталей призматичної форми. Дана схема дозволяє позбавити заготовку шести ступенів

вільності, що реалізується через шість установлювальних елементів (L1, L2, L3, L4, L5, L6). Установлювальну базу реалізують елементи L1, L2, L3; напрямну базу – L4, L5; опорну базу – L6. Заготовка фіксується у визначеному положенні затискним елементом С1 (рис. 5.7).

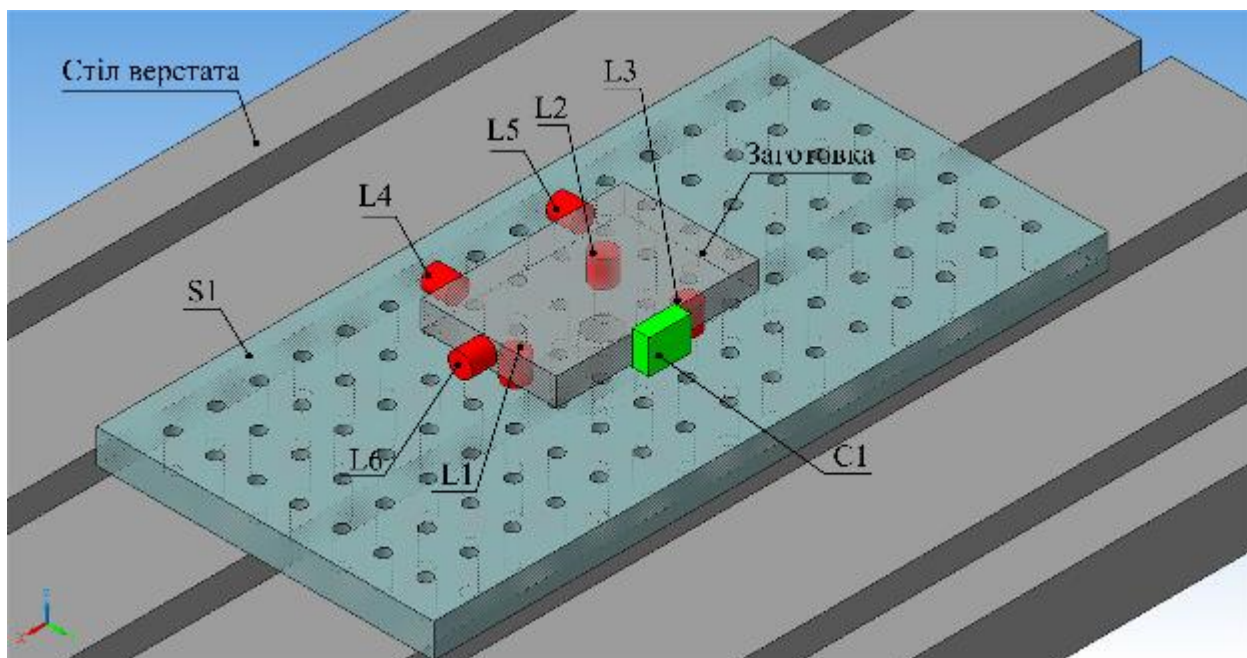


Рисунок 5.7 – Схема позиціонування функціональних елементів ВП за типовою схемою базування «3-2-1»

При позиціонуванні опорного елемента слід дотримуватися правил і вимог, що висуваються при «реальному» установленні опорного елемента на робочий стіл верстата. Отже, опорний елемент має бути розміщений по центру робочого стола верстата з умовою паралельності бокових поверхонь. Напрямок рядів отворів опорного елемента повинен співпадати з напрямком Т-подібних пазів робочого стола верстата (рис. 5.8).

Позиціонування опорного елемента S1 здійснюється у глобальній системі координат XYZ із співпадінням центральної точки нижньої поверхні опорного елемента S1 з площиною XY у точці O ($X = 0$; $Y = 0$; $Z = 0$).

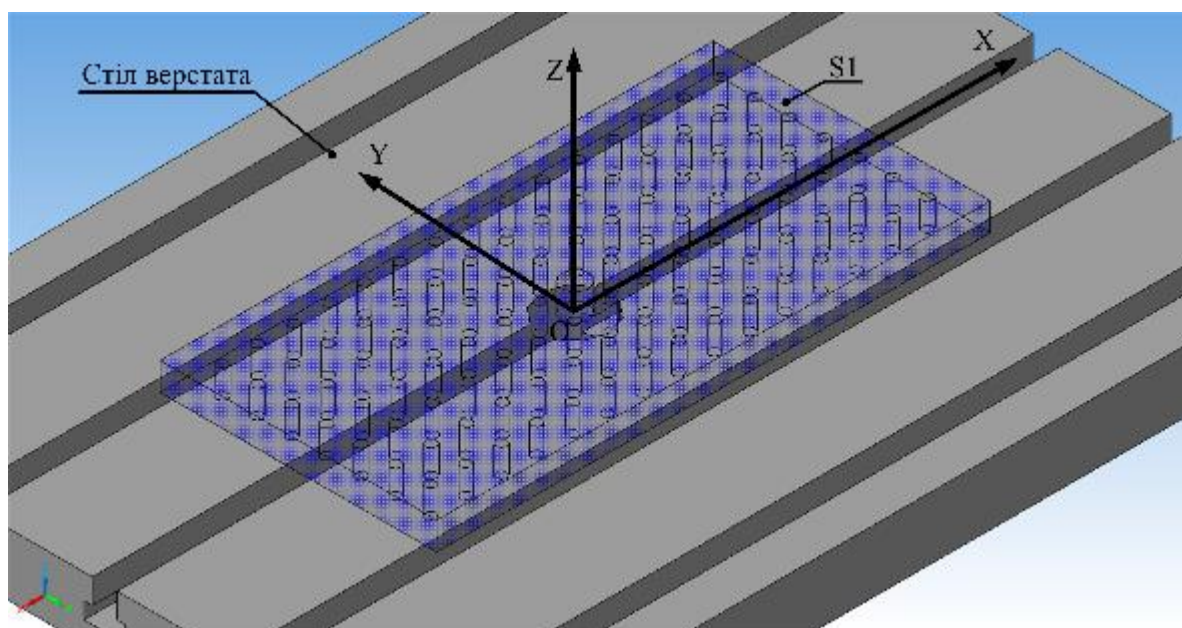


Рисунок 5.8 – Позиціонування опорного елемента S1 на столі верстата

Опорний елемент має сітку отворів із визначеним кроком, які використовуються для розміщення установлювальних і затискних елементів, а отже, їх позиціонування виконується за дискретною величиною.

Позиціонування установлювальних елементів здійснюється у площині XY, отже, визначаються координати за двома осями X та Y для кожного установлювального елемента. При автоматизованому позиціонуванні установлюваних елементів дотримуються основних положень теорії базування деталей. Для схеми базування «3–2–1», яка є однією з основних при базуванні корпусних деталей на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах, координати для елементів визначаються у такому порядку для:

- установлювальної бази (3 елементи);
- напрямної бази (2 елементи);
- опорної бази (1 елемент).

Установлювальна база призначається для поверхні, яка має найбільшу площу, та згідно з теорією базування реалізується трьома установлювальними елементами (L1, L2, L3), які розміщуються як рівносторонній трикутник. Для забезпечення стійкості заготовки з габаритними розмірами $L_W \times B_W$ у ВП даний

трикутник повинен описуватися колом максимального радіуса R_j , обмеженого половиною ширини заготовки $B_w/2$ (рис. 5.9).

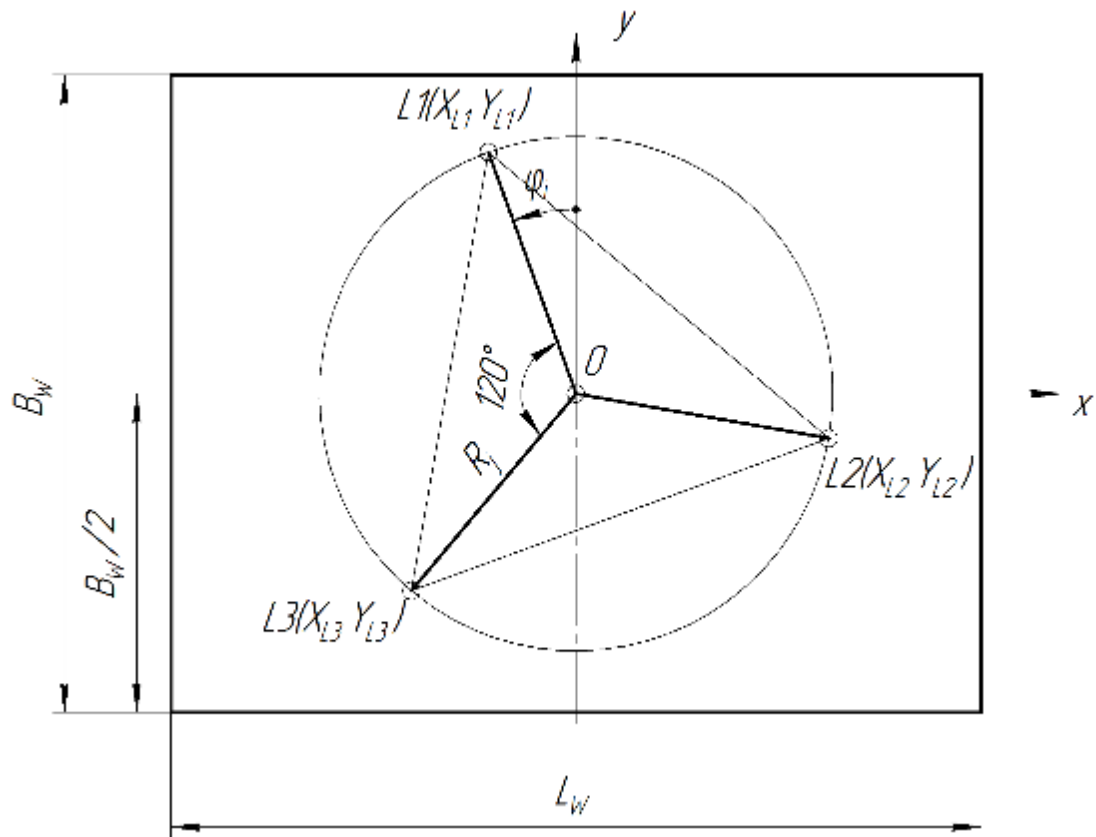


Рисунок 5.9 – Схема розміщення установлювальних елементів L1, L2, L3 для реалізації установлювальної бази

Позиціонування установлювальних елементів L1, L2, L3 здійснюється із застосуванням процедури вкладеного циклу [1] відносно двох параметрів: радіуса описаного кола R_j та кута повороту ϕ_i вершин трикутника з урахуванням умов уникнення зон безпеки. Відповідний алгоритм наведено на рис. 5.10.

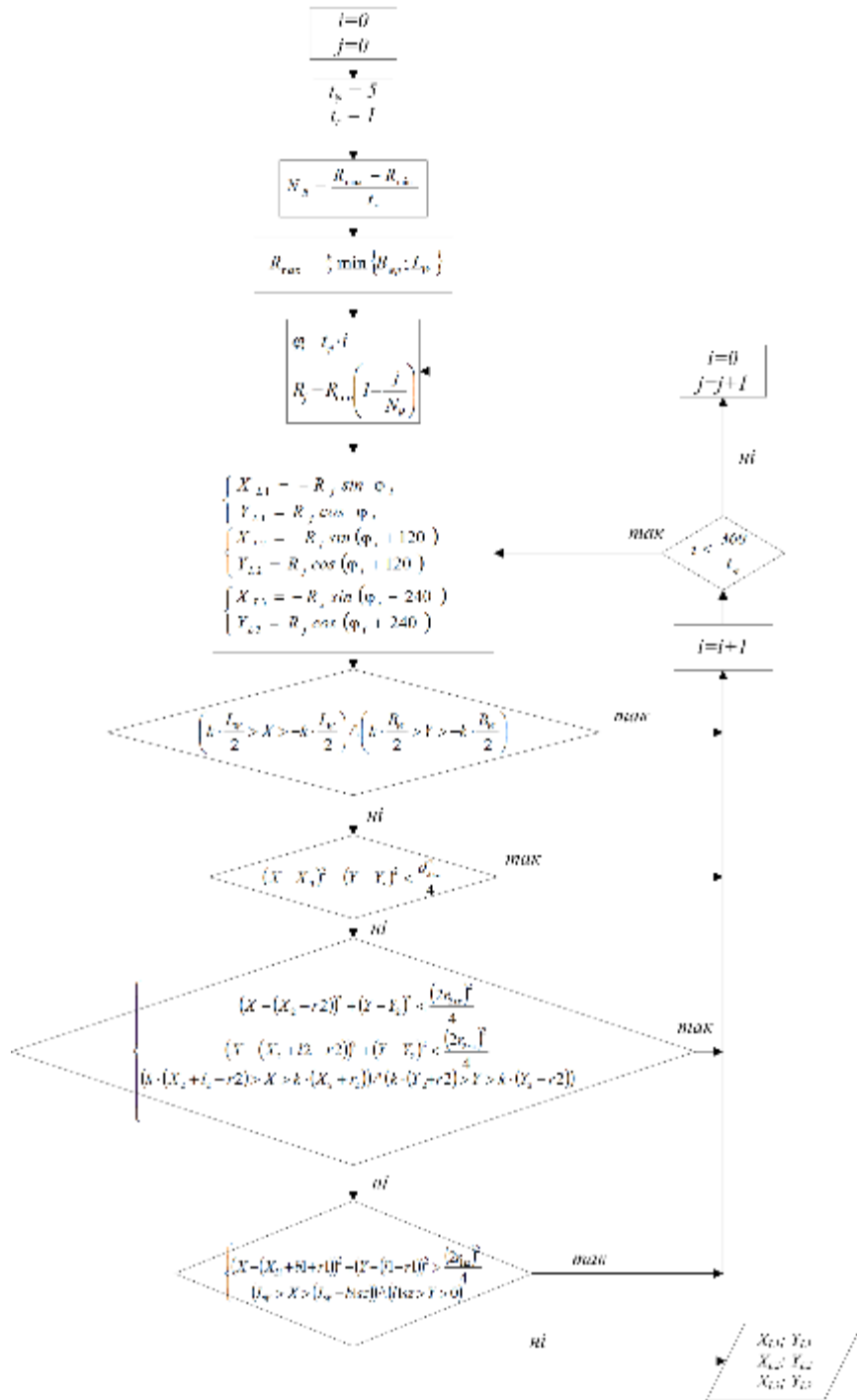


Рисунок 5.10 – Алгоритм позиціонування установлюваних елементів L1, L2, L3 для реалізації установлювальної бази

Оскільки алгоритмом передбачено розрахунок теоретичних координат, які не відповідають дійсним координатам сітки отворів опорного елемента, то необхідно визначити координати найближчого отвору, в якому буде розміщено установлюваний елемент. Для цього необхідно знайти мінімальну відстань Δ між

розрахунковою точкою та отворами, рішення якої реалізується за алгоритмом рівномірного пошуку функції дискретних аргументів [2] із урахуванням умови не потрапляння в зони безпеки:

$$\Delta = \sqrt{(X_{\text{отв } i} - X_{L1,L2,L3})^2 + (Y_{\text{отв } i} - Y_{L1,L2,L3})^2} \rightarrow \min.$$

Координати установлювальних елементів L1, L2, L3 по осі Z дорівнює висоті опорного елемента S1. Позиціонування установлювальних елементів L1, L2, L3 на опорному елементі S1 наведено на рис. 5.11.

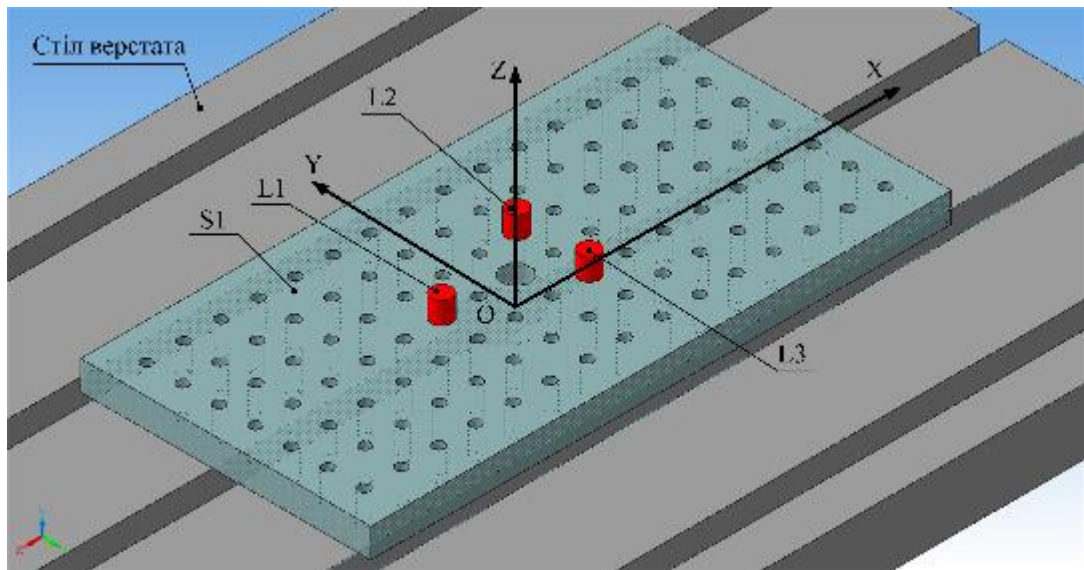


Рисунок .5.11 – Позиціонування установлювальних елементів L1, L2, L3

Напрямна база призначається для поверхні, яка має найбільшу довжину, та позбавляє заготовку двох ступенів вільності. Позиціонування двох установлюваних елементів (L4, L5) по осі X описуються запропонованими нерівностями та визначаються за алгоритмами, наведеними на рис. 5.12, .5.13.

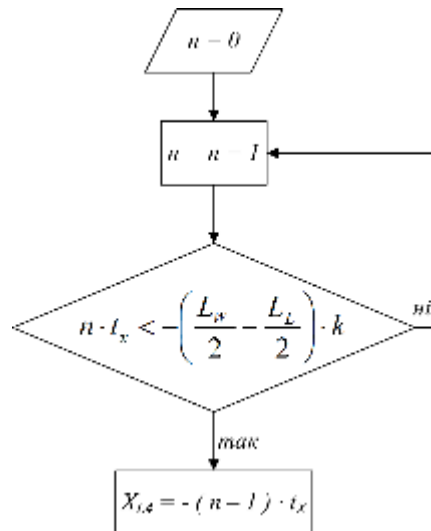


Рисунок 5.12 – Алгоритм позиціонування установлювального елемента L4 по осі X для реалізації напрямної бази

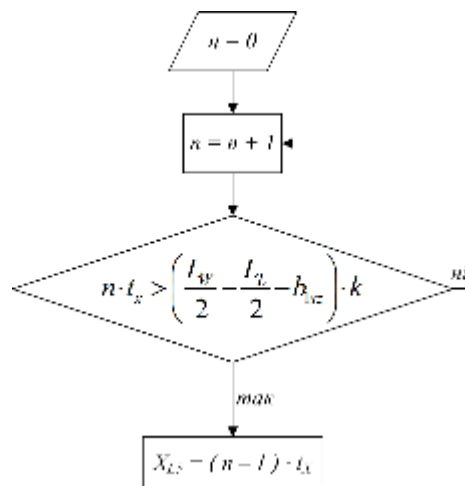


Рисунок 5.13 – Алгоритм позиціонування установлювального елемента L5 по осі X для реалізації напрямної бази

Позиціонування установлювальних елементів L4, L5 по осі Y виконується за розробленим алгоритмом, наведеним на рис. 5.14.

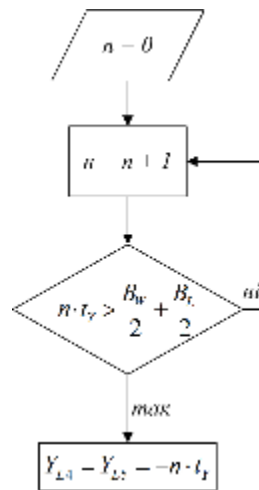


Рисунок .5.14 – Алгоритм позиціонування установлювальних елементів L4 і L5 по осі Y для реалізації напрямної бази

Координата установлювальних елементів L4 і L5 по осі Z визначається залежно від висоти опорного елемента S1 і висоти заготовки. Позиціонування установлювальних елементів L4 і L5 на опорному елементі наведена на рис. 5.15.

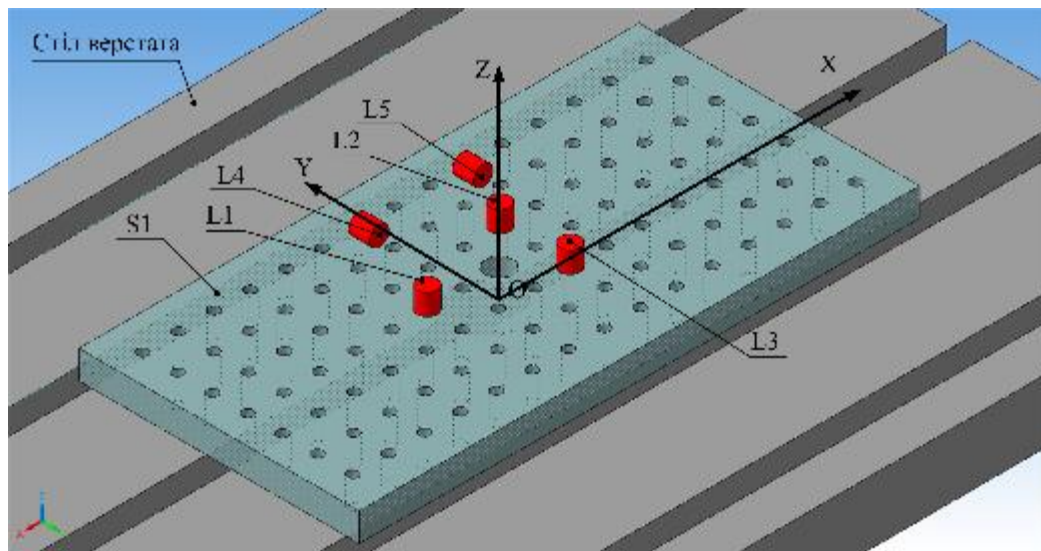


Рисунок 5.15 – Позиціонування установлювальних елементів L4 і L5

Опорна база, яка використовується у схемі базування «3–2–1», є плоскою поверхнею та позбавляє заготовку одного ступеня вільності. Установлювальний елемент L6, як правило, встановлюється по центру заготовки, а отже, координата $Y_{L6} = 0$. Для позиціонування установлювального елемента по осі X розроблено алгоритм, який наведено на рис. 5.16.

Координата установлювального елемента L6 по осі Z залежить від висоти опорного елемента S1 і висоти заготовки. Позичіонування установлювального елемента L6 на опорному елементі наведено на рис. 5.17.

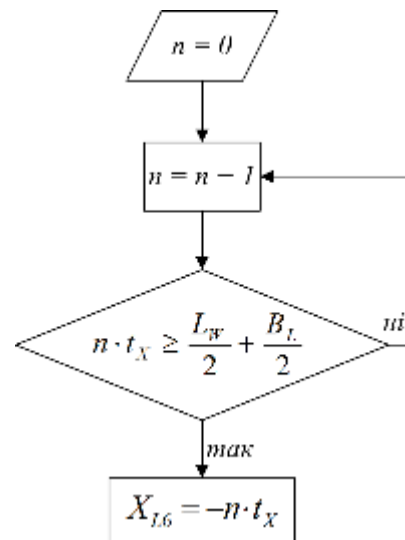


Рисунок 5.16 – Алгоритм позиціонування установлювального елемента L6 по осі X для реалізації опорної бази

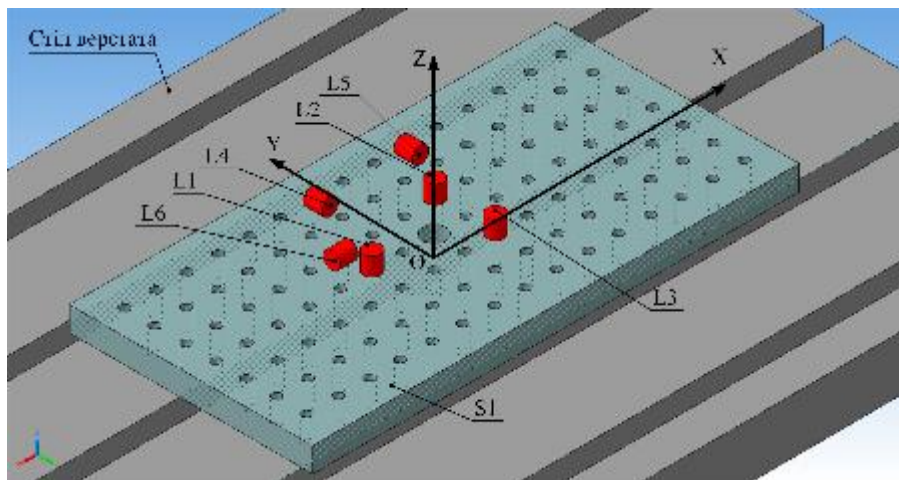


Рисунок 5.17 – Позичіонування установлювального елемента L6

Затискні елементи призначені для надійного закріплення заготовки та позбавлення заготовки переміщень під час формоутворення на верстаті, а отже, вибір місця прикладання затискного зусилля є важливою задачею у галузі проектування ВП. Основні положення технології машинобудування свідчать, що

місце розташування затискного елемента слід обирати таким, щоб зусилля затиску не призводило до зниження жорсткості системи «ВП – заготовка».

Затискні елементи, аналогічно до установлювальних елементів, позиціонуються за дискретною величиною через отвори у опорному елементі. Позиціонування виконується у площині XY за розробленим алгоритмами за двома осями X (рис. 5.18) та Y (рис. 5.19).

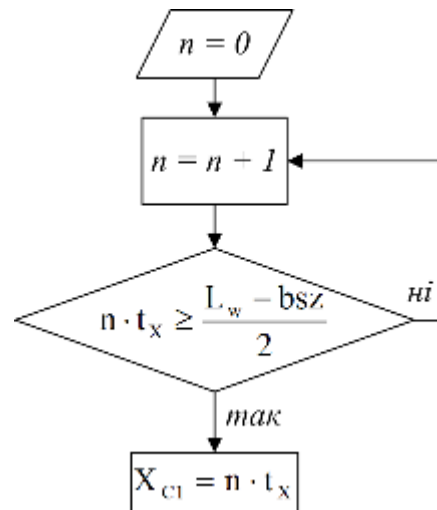


Рисунок 5.18 – Алгоритм позиціонування затискного елемента C1 по осі X

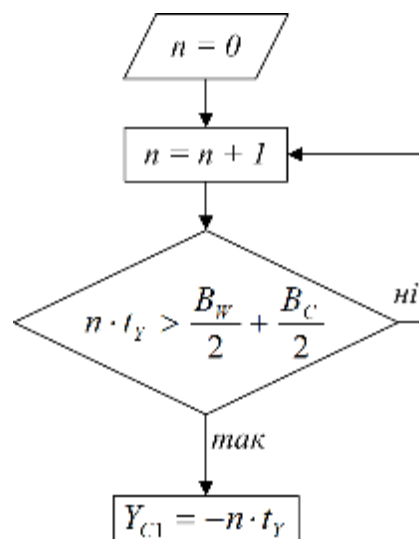


Рисунок 5.19 – Алгоритм позиціонування затискного елемента C1 по осі Y

Позиціонування затискного елемента С1 на опорному елементі S1 наведено на рис. 5.20.

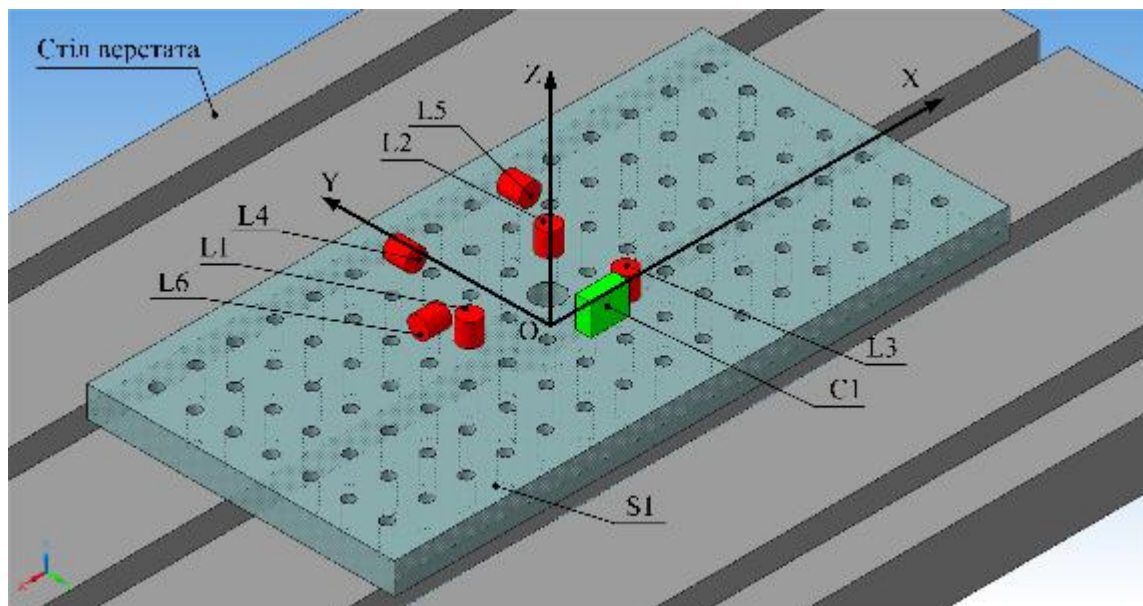


Рисунок 5.20 – Позиціонування затискного елемента С1

При позиціонуванні заготовки необхідно забезпечити співпадіння точки С, яка є центром базової поверхні заготовки, із глобальною системою координат XYZ у площині XY ($X = 0$; $Y = 0$). Величина позиціонування заготовки по координаті Z залежать від висоти опорного елемента h_{S1} і висоти установлювальних елементів $h_{L1,L2,L3}$ (рис. 5.21). У випадку, коли у компонованні ВП використовуються переналагоджувані установлювальні та затискні елементи, контакти з заготовкою у площині XY забезпечуються регулюванням відповідних елементів у межах заданого діапазону.

При використанні непереналагоджуваних установлювальних і затискних елементів необхідно виконати корекцію положення заготовки до контакту заготовки з функціональними елементами L4, L5, L6 на величину корекції ΔX_w , ΔY_w (рис. 5.22). Тобто точка С стає точкою С', із координатами, що визначаються за такими формулами:

$$X_{C'} = X_c \pm \Delta X_w; Y_{C'} = Y_c \pm \Delta Y_w;$$

де знак “+” відповідає корегуванню у напрямку координатної осі, а знак “-” відповідає корегуванню проти напрямку координатної осі.

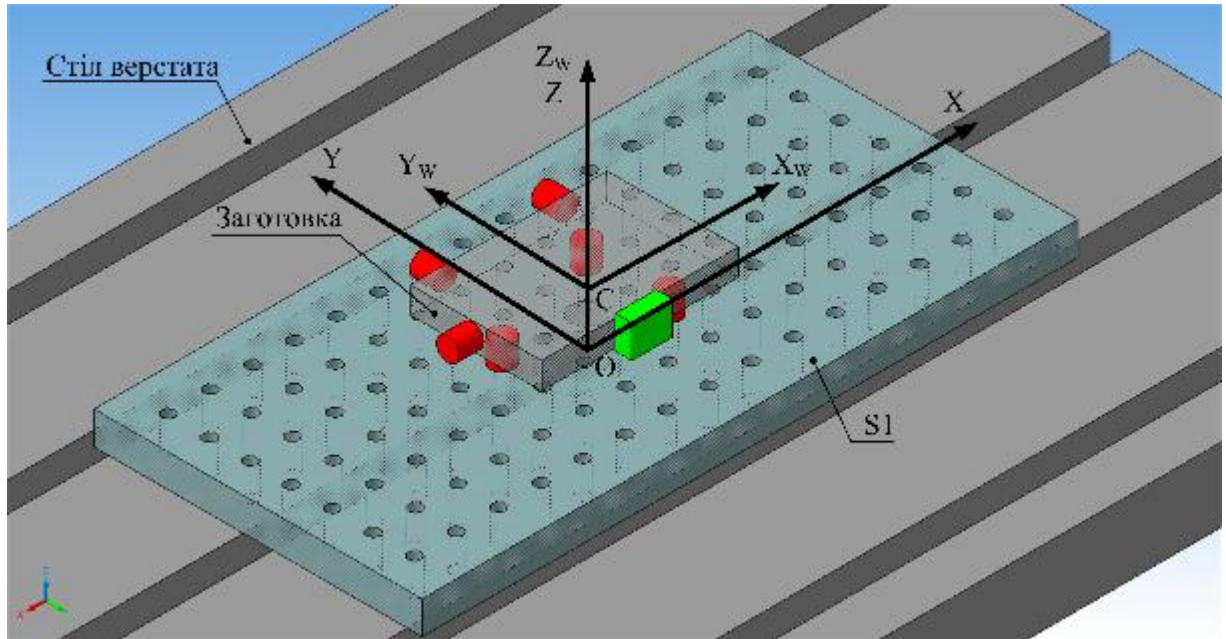


Рисунок 5.20 – Графічна інтерпретація позиціонування заготовки з використанням переналаджуваних функціональних елементів

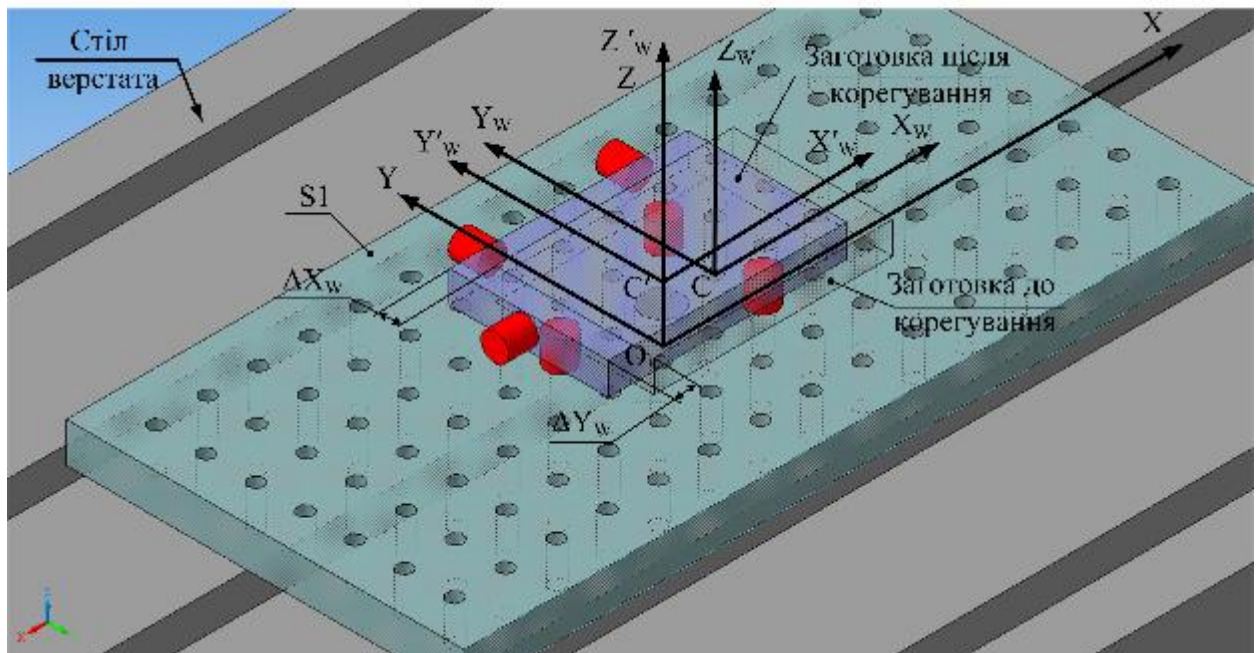


Рисунок 5.21 – Графічна інтерпретація позиціонування заготовки з використанням непереналаджуваних функціональних елементів

Переміщення заготовки на величини корекції ΔX_W , ΔY_W по осям X і Y відповідно виконується за нижче наведеними формулами:

$$\Delta X_W = -n \cdot t_x + \frac{L_W}{2} + \frac{B_L}{2}; \Delta Y_W = n \cdot t_y - \frac{B_W}{2} - \frac{B_L}{2}.$$

5.4 Висновки

1. Створено комп'ютерну програму для що дає можливість здійснювати збереження, пошук та перегляд довідкової інформації щодо забезпечення процесу проектування верстатного пристрою (ВП).

2. Створено базу даних для накопичення, уточнення, вдосконалення, зберігання та надання інформації про функціональні елементи, металорізальне обладнання.

3. Запропоновано методику автоматизованого позиціонування функціональних елементів верстатних пристроїв (ВП) з урахуванням конструктивно-технологічних параметрів оброблюваних поверхонь заготовки.

ВИСНОВКИ

У науково-дослідній роботі вирішена актуальна науково-практична задача підвищення ефективності проектування спеціальної модульної технологічної оснастки (ТО) на основі створення інтегрованої технології.

1. Проаналізовано конструкції відомих стандартних та спеціальних різальних інструментів (РІ) із змінними непереточуваними пластинами (ЗНП), елементів верстатних пристроїв (ВП), що дозволило розробити класифікатор стандартних конструктивних елементів.

2. Проаналізовано існуючі системи автоматизованого проектування різального інструменту та верстатних пристроїв їх структура і методики проектування.

3. Створено бази даних номенклатури виробів світових виробників різального інструменту та верстатних пристроїв, що дозволило систематизувати інформацію за конструкторсько-технологічними, загальноінженерними, нормативно-довідковими та оптимізаційно-розрахунковими показниками.

4. Розроблено оптимальну структуру технологічного процесу обробки різального інструменту при виготовленні конструктивних елементів із бази даних посадкових гнізд під змінні непереточувані пластини.

5. Розроблено систему адаптування стандартних технологічних рішень під конкретні виробничі умови, що дозволило виконати експериментальну перевірку розробленої методології, алгоритмів та програмних модулів.

6. Результати досліджень впроваджено у виробництво при виготовленні фрез дискових ЭНЕСИ 50.080.001.01, ЭНЕСИ 50.080.000.02, MFH16-W15-03-2 на механічній ділянці ПАТ «Роменський завод «ТРАКТОРОЗАПЧАСТИНА» (м. Ромни). Виробничі випробування підтвердили ефективність запропонованого підходу до проектування та виготовлення фрезерних інструментів за допомогою розробленого додаткового модуля до САД системи SolidWorks, який забезпечує проектування спеціального різального інструменту зі змінними непереточуваними пластинами.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ряховский А. В. Разработка и внедрение комплекта унифицированной технологической оснастки для обработки корпусных деталей специзделий: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Ряховский Алексей Владимирович. – Харків, 1996. – 135 с.
2. Іванов В.О. Вибір оптимальних компоновок верстатних пристроїв для верстатів з ЧПК: дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Іванов Віталій Олександрович. – Харків, 2010. – 239 с.
3. Hashemi H. A case-based reasoning for design of machining fixture / H. Hashemi, A. M. Shaharoum, I. Sudin // *Int Journal of Manufacturing Technology*, 2014. – Vol. 74. – P. 113–124.
4. Wang H. Computer aided fixture design: recent research and trends / H. Wang, Y. Rong, H. Li, P. Shaun // *Computer-Aided Design*, 2010. – Vol. 42 (12). – P. 1085–1094.
5. International Organization of Motor Vehicle Manufacturers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.oica.net> (04.03.2017).
6. Gomez Valdez C. R. The impact of manufacturing flexibility on system performance a simulation based approach: Ph.D. Thesis. – Nottingham: University of Nottingham, 2010. – 327 p.
7. Криводуд І. О. Аналіз технологічних можливостей сучасних свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів / І. О. Криводуд, І. М. Дегтярьов, В. О. Іванов // Сучасні технології у промисловому виробництві : матер. III Всеукр. міжвузівської наук.-техн. конф., 22–25 квітня 2014 р., Суми: у 2 ч. – Суми: Сумський державний університет, 2014. – Ч. 1. – С. 28.
8. Karpus V., Ivanov V., Dehtiarov I., Zajac J., Kurochkina V. Technological Assurance of Complex Parts Manufacturing. In: Ivanov V. et al. (eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019, pp. 51–61, doi: 10.1007/978-3-319-93587-4_6.

9. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : навч. посіб. для ВНЗ. Ч. 1. Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання / В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнєцов, А. М. Кириченко та ін. – Кіровоград: Кіровогр. держ. техн. ун-т. – 2003. – 422 с.

10. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: навч. посіб. для ВНЗ. Ч. 2. Проектування та дослідження вузлів агрегатно-модульного технологічного обладнання / В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнєцов, А. М. Кириченко та ін. – Кіровоград: Кіровогр. держ. техн. ун-т. – 2003. – 286 с.

11. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: Навч. посіб. для ВНЗ. Ч. 3. Агрегатно-модульне технологічне обладнання нового покоління, його оснащення та інструментальне забезпечення / В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнєцов, А. М. Кириченко та ін. – Кіровоград: Кіровогр. держ. техн. ун-т. – 2003. – 507 с.

12. Інтенсифікація процесів механічної обробки: монографія / В. Є. Карпусь, В. О. Іванов, О. В. Котляр та ін.; за ред. В. Є. Карпуся. – Суми: Сумський державний університет, 2012. – 436 с.

13. Васильев В. Н. Организационно-экономические основы гибкого производства / В. Н. Васильев, Т. Г. Садовська. – Москва : Высшая школа, 1988. – 272 с.

14. Bi Z. M. Current status of reconfigurable assembly systems / Z. M. Bi, L. Wang, S. Y. Lang. // International Journal of Manufacturing Research. – 2007. – Vol. 2, No. 3. – pp. 303–328.

15. Jonsson M. On manufacturing technology as an enabler of flexibility: PhD Thesis. – Linkoping University, Linkoping, Sweden, 2013. – 210 p.

16. Обратимая технологическая оснастка для ГПС / Н. Д. Жолткевич, И. Я. Мовшович, А. С. Кобзев и др. – К. : Техніка, 1992. – 216 с.

17. Гибкие производственные системы / П. Н. Белянин, М. Ф. Идзон, А. С. Жогин – М.: Машиностроение, 1988. – 255 с.

18. Eraslan E. Fuzzy multi-criteria analysis approach for the evaluation and classification of cognitive performance factors in flexible manufacturing systems /

E. Eraslan, M. Kurt. // International Journal of Production Research. – 2007. – Vol. 45, Issue 5. – p. 1101–1118.

19. Пуховский Е. С. Технологические основы гибкого автоматизированного производства / Е. С. Пуховский. – Киев : Высшая школа, 1989. – 240 с.

20. Бондаренко С. Г. Основы технології машинобудування / С. Г. Бондаренко. – Львів: Магнолія, 2006. – 500 с.

21. Микитянский В. В. Точность приспособлений в машиностроении. – М. : Машиностроение, 1984. – 128с.

22. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 70511, Україна, Комп'ютерна програма “Database for Fixture Design” / Іванов В. О., Ващенко С. М., Багрій Я. В.; авторські майнові права – Сумський державний університет; дата реєстрації 17.02.2017.

23. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 72318, Україна, Методика просторового позиціонування структурних елементів системи «верстатний пристрій – заготовка» / Іванов В. О., Павленко І. В., Дрофа К. А.; авторські майнові права – Сумський державний університет; дата реєстрації 21.06.2017.

24. Болотин Х. Л. Станочные приспособления / Х. Л. Болотин, Ф. П. Костромин. – М. : Машиностроение, 1973. – 344 с.

25. Вардашкин Б. Н. Станочные приспособления. Справочник, в 2-х т. Т. 1 / Б. Н. Вардашкин, А. А. Шатилова. – М. : Машиностроение, 1984. – 592 с.

26. Технологія машинобудування / Є. О. Горбатюк, М. П. Мазур, А. С. Зенкін та ін. – Львів : Новий Світ–2000, 2009. – 358 с.

27. Automated fixture configuration for rapid manufacturing planning / S. Nelaturi, A. Rangarajan, C. Fritz, T. Kurtoglu // Computer-Aided Design. – 2014. – Vol. 46. – P. 160–169.

28. Asante J. N. A combined contact elasticity and finite element-based model for contact load and pressure distribution calculation in a frictional workpiece-fixture

system / J. N. Asante // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 39. – P. 578–588.

29. Multi-objective optimization design of a fixture layout considering locator displacement and force–deformation / Z.Liu, M. Wang, K. Wang, X. Mei // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 67. – P. 1267–1279.

30. Machining fixture layout design for milling operation using FEA, ANN and RSM / M.Vasundara, K. P. Padmahaban, M. Sabareeswaran, N. RajGanesh // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 38. – P. 1693–1703.

31. Li B. Optimal fixture design accounting for the effect of workpiece dynamics / B. Li, S. Melkote // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2001. – Vol. 28. – P. 701–707.

32. Nalbandh A. H. Fixture design optimization using genetic algorithm-a review / A. H. Nalbandh, C. C. Rajyaguru // Journal of information, knowledge and research in mechanical engineering. – 2013. – Vol. 2. – P. 466–471.

33. Amaral N. Finite element analysis study on fixtured workpiece deformation : Bachelor of Science Thesis – Worcester, USA, 2000. – 109 p.

34. Papastathis T. N. Modelling and design methodology for fully-active fixtures : PhD Thesis. – The University of Nottingham, Great Britain, 2010. – 272 p.

35. Clamping force optimization for minimum deformation of workpiece by dynamic analysis of workpiece-fixture system / S. Selvakumar, K. P. Arulshri, K. P. Padmanaban, K. S. Sasikumar // World Applied Sciences Journal. – 2010. – Vol. 7. – P. 840–846.

36. Kumbhar N. Finite element modelling and analysis of workpiece-fixture system / N. Kumbhar, G. Patil, S. Mohite, M. Sutar // International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering. – 2012. – Vol. 2, Is. 2. – P. 60–65.

37. Hu S. An integrated model of a fixture–workpiece system for surface quality prediction / S. Hu, Y. Liao // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2001. – Vol. 17. – P. 810–818.

38. Kang Y. Computer-aided fixture design verification. Part 3. Stability analysis / Y. Kang, Y. Rong, J. C. Yang // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2003. – Vol. 21. – P. 842–849.
39. Asante J.N. Effect of fixture compliance and cutting conditions on workpiece stability / J. N. Asante // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 48. – P. 33–43.
40. Cioata V. The machining error due to contact deformation of workpiece-
fixture system / V. Cioata, I. Kiss // *ACTA Technical Bulletin of Engineering*. – 2009. – P. 33–36.
41. Zheng, Y. Finite element analysis for fixture stiffness : PhD Thesis. – Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA, 2005. – 148 p.
42. Asada H. Kinematics analysis of workpart fixturing for flexible assembly with automatically reconfigurable fixtures / H. Asada, A. By // *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation* / H. Asada, A. By., 1985. – Vol. 1, No. 1. – P. 86–93.
43. Rong Y. Automated generation of modular fixture configuration design / Y. Rong, Y. Bai // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 1997. – Vol. 119(2) P. 208–219.
44. Chou Y.C. Automated fixture design for concurrent manufacturing planning / Y.C. Chou // *Concurrent Engineering: Res. & Appl.* – 1993. – Vol. 1. – P. 219–229.
45. Wu Y. Automated generation of dedicated fixture configuration / Y. Wu, Y. Rong, T. Chu // *International Journal of Computer Applications in Technology*. – 1997. – Vol. 10, No. 3/4. – P. 213–235.
46. Trappey A.J.C. Computer-aided fixture analysis using finite element analysis and mathematical optimization modeling / A.J.C. Trappey, C.S. Su, J.L. Hou // *ASME INECE, MED*. – 1995. – Vol. 2-1, Nov. 12–17. – P. 777–787.
47. De Meter E.C. A model to predict minimum required clamp pre-loads in light of fixtureworkpiece compliance / E.C. De Meter, W.Xie, S.Choudhuri, S.Vallapuzha, M.W. Trethewey // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2001. – Vol. 41. – P. 1031–1054.

48. Kang J. Geometric and kinetic model based computer-aided fixture design verification / J. Kang, Y. Rong, J. A. Yang // *ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering*. – 2003. – № 3. – P. 187–199.

49. Xiong C. H. Clamping planning in workpiece–fixture systems / C. H. Xiong, Y. L. Xiong, M. Y. Wang // *Manufacturing Engineering Division*. – 2003. – №14.– p. 267–272.

50. Wang Y. F. Off-line modeling and planning of optimal clamping forces for an intelligent fixturing system / Y. F. Wang, Y. S. Wong, J. Y. Fuh // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1999. – № 39. – P. 253–271.

51. Tao Z. G. Automatic generation of dynamic clamping forces for machining fixtures / Z. G. Tao, A. S. Kumar, A. Y. Nee // *International Journal of Production Research*. – 1999. – № 37. – P. 2755–2776.

52. Liu J. J. Machining fixture verification for linear fixture systems / J. J. Liu, D. R. Strong // *International Journal of Production Research*. – 2002. – № 40. – P. 3441–3459.

53. Liu J. J. Machining fixture verification for nonlinear fixture systems / J. J. Liu, D. R. Strong // *International Journal of Production Research*. – 2003. – № 21. – P. 426–437.

54. Hurtado J. F. A model for synthesis of the fixturing configuration in pin-array type flexible machining fixtures / J. F. Hurtado, S. N. Melkote // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2002. – № 42. – P. 837–849.

55. Wang M. Y. Tolerance analysis for fixture layout design / M. Y. Wang // *Assembly Automation*. – 2002. – № 22. – P. 153–162.

56. Li B. Fixture clamping force optimization and its impact on workpiece location accuracy / B. Li, S. N. Melkote // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2001. – № 17. – P. 104–113.

57. Deng H. Analysis and synthesis of fixturing dynamic stability in machining accounting for material removal effect : PhD Thesis. – Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2006. – 177 p.

58. Brost R. C. A complete algorithm for synthesizing modular fixtures for polygonal parts / R. C. Brost, K. Y. Goldberg // Robot Autom. – 1994. – № 1. – P. 535–542.
59. Wu Y. Automated modular fixture planning: geometric analysis / Y. Wu, Y. Rong, W. Ma, S. R. Leclair // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 1998. – № 14. – P. 1–15.
60. Hu W. A fast interference checking algorithm for automated fixture design verification / W. Hu, Y. Rong // International Journal of Production Research. – 2000. – № 16. – P. 571–581.
61. Cornella J. On computing form closure grasps/ fixtures for non-polygonal objects / J. Cornella, R. Suarez // Macro Assembly and Manufacturing. – 2005. – P. 138–143.
62. Phoomboplab T. Process yield improvement through optimum design of fixture layouts in 3D multistation assembly systems / T. Phoomboplab, D. Ceglarek // ASME Trans., Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2008. – Vol. 130 No. 061005.
63. Yun-hui L. Optimal fixture layout design for 3D workpieces / L. Yun-hui // International Journal of Robotics and Automation. – 2004. – № 5. – P. 5274–5279.
64. Wang M. Y. Automated fixture layout design for 3D workpieces / M. Y. Wang // International Journal of Robotics and Automation. – 1999. – № 2. – P. 1577–1582.
65. Locating error analysis and tolerance assignment for computer-aided fixture design / Y. Rong, W. Hu, Y. Kang et al. // International Journal of Production Research. – 2001. – № 39. – P. 3529–3545.
66. Estrems M. Influence of fixtures on dimensional accuracy in machining processes / M. Estrems, H. T. Sanchez, F. Faura // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2003. – № 21. – P. 384–390.
67. Hou J. L. Methodology for applying V-blocks and clamps to non-prismatic workpart fixtures / J. L. Hou, A. J. Trappey // International Journal of Computer Applications in Technology. – 1997. – № 10. – P. 152–167.

68. Afzeri K. Optimization of pin type fixture configurations / K. Afzeri, M. Konneh, A. J. Sutjipto, Y. Aminanda // *International Journal Science Engineering Technology*. – 2008. – № 1. – P 33–40.

69. Cai W. Robust pin layout design for sheet-panel locating / W. Cai // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2006. – № 28. – P. 486–494.

70. Al-Habaibeh A. Experimental design and investigation of a pin-type reconfigurable clamping system for manufacturing aerospace components / A. Al-Habaibeh, N. Gindy, R. M. Parkin // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2003. – № 12. – P. 1771–1777.

71. Hurtado J. A model for synthesis of the fixturing configuration in pin-array type flexible machining fixtures / J. Hurtado, N. Melkote // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2002. – № 42. – P. 837–849.

72. Vasundara M. Recent developments on machining fixture layout design, analysis, and optimization using finite element method and evolutionary techniques / M. Vasundara, K. P. Padmanaban // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – № 70. – P. 79–96.

73. Методология IDEF0 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://alice.pnzgu.ru/case/caseinfo/bpwin/part3.php>.

74. Karpus V., Ivanov V., (2012) Choice of Optimal Construction of Modular Reusable Fixtures. *J. Rus Eng Res*, Vol. 32, pp. 213–219.

75. Карпусь В. Є. Оптимізація механічної обробки тіл обертання: монографія / В. Є. Карпусь, О. В. Котляр, В. О. Іванов; за ред. В. Є. Карпуся. – Харків : НТМТ, 2012. – 296 с.

76. Павленко, І.В. Забезпечення умов стійкості заготовки у верстатному пристрої зі схемою базування за трьома площинами/ І. В. Павленко, В. О. Іванов // *Вісник СНАУ: науковий журнал. Серія "Механізація та автоматизація виробничих процесів"*. – 2015. – № 11 (27). – С. 23–26.

77. Пат. 98925 U Україна, МПК (2015.01) В23В 39/00. Переналагоджуваний установлювальний-затискний модуль для обробки деталей типу важелів / В.О. Іванов, І.М. Дегтярьов, В.Є. Карпусь, (Україна); заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u201413066; заявл. 05.12.2014; опубл. 12.05.2015, бюл. № 9.

78. Батищев Д. И. Методы оптимального проектирования / Д. И. Батищев. – М : Радио и связь, 1984. – 248 с.

79. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 83602, Україна, Структурно-функціональна модель процесу проектування верстатних пристроїв / Іванов В. О.; авторські майнові права – Сумський державний університет; дата реєстрації 12.12.2018.

80. Пасічник В. А. Конструктивно-технологічне моделювання композиційних конструкцій з використанням системного аналізу / В. А. Пасічник, О. О. Хмуренко. // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2015. – № 4. – С. 15–20.

81. Іванов В. О. Структурно-функціональне моделювання процесу проектування верстатних пристроїв / В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, С. М. Ващенко, Й. Заяць, А. І. Кармаза // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2017. – № 17 (1239). – С. 30–37.

82. Іванов В. О. Експериментальні дослідження верстатних пристроїв для механічної обробки деталей типу важелів / В. О. Іванов, І. М. Дегтярьов, І. Е. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2017. – № 26 (1248). – С. 105–111.

83. Косилова А. Г. Справочник технолога-машиностроителя : справочник : в 2 т. / А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков. – Москва.: Машиностроение, 1985. – Т. 2 – 656 с.

84. Ivanov V., Dehtiarov I., Zajac, J. Flexible Fixtures for Parts Machining in Automobile Industry, Proceedings of 2nd EAI Int. Conf. on Management of Manufacturing Systems (MMS-2017), 2018, 15 pages; doi: 10.4108/eai.22-11-2017.2274155.

85. Ivanov V., Dehtiarov I., Denysenko Y., Malovana N., Martynova N. Experimental Diagnostic Research of Fixture. *Diagnostyka*, 2018, Vol. 19, No. 3, pp. 3–9, doi: 10.29354/diag/92293.

86. Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – 576 с.

87. Ivanov V., Mital D., Karpus V. et al. Numerical Simulation of the System “Fixture – Workpiece” for Levers Machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, Vol. 91, Issue 1-4, pp. 79–90, doi: 10.1007/s00170-016-9701-2.

88. Оптимізація конструкції верстатного пристрою для механічної обробки деталей типу важелів / І.О. Косов, М.О. Косов, І.М. Дегтярьов та ін.// Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвуз. науково-техн. конф., 19–22 квітня 2016 р., Суми : у 2-х ч. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – Ч.1. – С. 29.

89. Ильицкий В. Б. Станочные приспособления. Конструкторско–технологическое обеспечение эксплуатационных свойств / В. Б. Ильицкий, В. В. Микитянский, и др. М. : Машиностроение, 1989. – 208 с.

90. Мурашов А. М. Агрегатирование станочных приспособлений: книга / А. М. Мурашов. – М : Машиностроение, 1966. – 185 с.