

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
(проміжний)

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

Д.І. Курбатов

Керівник НДР
професор кафедри технології
машинобудування, верстатів та інструментів
д-р. техн. наук, доцент

Д.В. Криворучко

2017

Рукопис закінчено 18 грудня 2017 р.

Результати цієї роботи розглянуті на вченій раді СумДУ, протокол від 28.12.2017 р. № 3

СПИСОК АВТОРІВ

Провідний науковий співробітник, д-р. техн. наук (Керівник НДР)	18.12.2017	Д.В. Криворучко (Вступ, Розділи 1–4, Загальні висновки)
Провідний науковий співробітник, канд. техн. наук (Відповідальний виконавець)	18.12.2017	В.О. Іванов (Розділ 2)
Провідний науковий співробітник, канд. техн. наук	18.12.2017	С.В. Швець (Реферат, Розділ 1)
Науковий співробітник, канд. техн. наук	18.12.2017	В.О. Колесник (Розділ 1–3)
Молодший науковий співробітник, канд. техн. наук	18.12.2017	І.М. Дегтярьов (Розділ 1–4)
Молодший науковий співробітник, канд. техн. наук	18.12.2017	І.В. Павленко (Підрозділи 3.2-3.3)
Лаборант	18.12.2017	К.О. Дрофа (Підрозділ 3.1)
Лаборант	18.12.2017	В.С. Капанайко (Підрозділ 4.1)
Лаборант	18.12.2017	А.І. Кармаза (Підрозділ 4.2)
Лаборант	18.12.2017	В.Г. Фортанюк (Додаток А)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 127 с., 11 табл., 68 рис., 30 формул, 1 додаток, 120 джерел.

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ, ПРОГРАМА ДЛЯ ВЕРСТАТА З ЧПК, РІЗАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ, ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОСНАЦЕННЯ, 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	10
1.1 Проблеми сучасного серійного машинобудівного виробництва	10
1.2 Гнучкість модульного технологічного оснащення.....	14
1.3 Точність модульного технологічного оснащення	24
1.4 Мета та задачі науково-дослідної роботи.....	40
1.5 Висновки	41
2 Особливості автоматизованого проектування модульної технологічної оснастки на прикладі різального інструменту	42
2.1 Класифікація типових поверхонь різального інструменту для закріплення змінних непереточуваних пластин	42
2.2 База даних елементарних поверхонь різального інструменту	47
2.3 Автоматизоване проектування модульної технологічного оснащення	56
2.4 Висновки	64
3 Оптимізація структури технологічного процесу обробки елементів модульного технологічного оснащення.....	65
3.1 Методика проведення та виявлення резервів оптимізації модульного технологічного оснащення.....	65
3.2 Оптимізація технологічного процесу обробки модульного технологічного оснащення	71
3.3 Дослідження модульного технологічного оснащення для типового технологічного процесу методами чисельного моделювання	77
3.4 Висновки	91
4 Методика, алгоритм та програма адаптування стандартних керуючих програм для чпк під конкретні виробничі умови	93
4.1 Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану різального інструменту під змінні непереточувані пластини	93

4.2	Експериментальні дослідження частот власних коливань різального інструменту під змінні непереточувані пластини	99
4.3	Виконання експериментальних досліджень механічної обробки та оцінювання точності обробки корпусу різального інструменту під змінні непереточувані пластини.....	103
4.4	Висновки	112
Висновки	113
Перелік джерел посилання		115

ВСТУП

В умовах жорсткої конкуренції, стрімкого розвитку та використання новітніх технологій, автотракторна галузь на виробничих підприємствах усього світу проводить постійний пошук впровадження нових та більш ефективних технологічних процесів (ТП). При цьому важливу роль у забезпеченні випуску конкурентоспроможної продукції відіграють верстатні пристрої (ВП), що підтверджується тим, що їх частка у загальному обсязі технологічного оснащення складає 70–80% [1], витрати при технологічній підготовці виробництва, проектуванні та виготовленні ВП досягають 90% [2], вартість ВП становить 10–20% загальної вартості виробничих систем [3], крім того, до 40% бракованих деталей в машинобудуванні виникає через недосконалість ВП [4].

Сучасні підходи до виробництва в автотракторній галузі базуються на розмежуванні виготовлення окремих вузлів та деталей на підрядних підприємствах, таких як ПАТ «Роменський завод «Тракторозапчастина» (м. Ромни), ТОВ «МЗАТЗ» (м. Мелітополь), Харківський автомобільний ремонтний завод № 110 МО України (м. Харків) та ін. У даний час на вищевказаних підприємствах активного розвитку набуло застосування верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК), ефективність застосування яких обґрунтована багатомономенклатурністю деталей та середньосерійним типом виробництва. Збільшення номенклатури виробів потребує ускладнення проектно-конструкторських робіт із виготовлення технологічної оснастки, особливо ВП. Багатомономенклатурність 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.

У зв'язку зі стрімким розвитком технологічних можливостей сучасних металорізальних верстатів, а також тенденцій щодо можливості здійснення

багатокоординатної обробки за мінімальну кількість установлень, гнучкі ВП можуть бути успішно застосовані для обробки деталей типу важелів, що складають 9% за кількістю та 6% за трудомісткістю від загальної кількості деталей, оброблюваних на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах. На основі даних Міжнародної організації виробників транспортних засобів (International Organization of Motor Vehicle Manufacturers) [5] річний випуск продукції автомобілебудівної галузі у світі досягає 90 млн. штук, тому розроблення та впровадження гнучких ВП, які сприяють зменшенню часу при переналагодженні є актуальною науково-практичною задачею та визначає напрямок дисертаційного дослідження.

Метою науково-дослідної роботи є 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 багатокоординатної обробки на верстатах із ЧПК.

Для досягнення поставленої мети сформульовано задачі:

– проаналізувати деталі типу важелів, систематизувати їх за конструкторсько-технологічними особливостями та запропонувати альтернативний підхід до проектування ТП при обробці на багатокоординатних верстатах;

– запропонувати та розробити конструкцію ВП, здатну забезпечити установлення деталей у певному діапазоні розмірів при забезпеченні необхідної точності та можливості багатокоординатної обробки методами параметричної оптимізації;

– обґрунтувати функціональну залежність визначення точності обробки заготовок від ступеня гнучкості ВП;

– поєднанням результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень провести комплекс заходів із визначення точності обробки деталей у ВП запропонованої конструкції;

– розробити рекомендації щодо використання запропонованого ВП із подальшим впровадженням результатів досліджень у виробництво.

Об'єкт дослідження – технологічний процес обробки деталей типу важелів.

Предмет дослідження – забезпечення технологічних показників верстатного пристрою для обробки деталей типу важелів.

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 скінченних елементів. Достовірність теоретичних розробок підтверджено результатами експериментальних досліджень, виконаних у лабораторних та виробничих умовах.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що на підставі аналізу номенклатури деталей типу важелів та їх методів обробки, а також тенденції до інтенсифікації ТП запропоновано перспективний підхід багатокоординатної обробки, що у сукупності із розробленим ВП дозволило зменшити трудомісткість виготовлення та кількість одиниць оснащення, а також забезпечити необхідну точність, сприяючи ефективності механічної обробки. При цьому:

– вперше запропоновано математичну залежність точності ВП від його ступеня гнучкості при обробці двоплечих важелів на багатоцільових верстатах із ЧПК, що у сукупності з тенденцією до інтенсифікації виробництва дозволяє обґрунтовано вибрати компоновання ВП для заданих виробничих умов серійного виробництва;

– виявлено взаємозв'язок між конструкторськими та технологічними параметрами деталей типу важелів, що надало подальшого розвитку процесу пошуку компоновань ВП для заданих виробничих умов при автоматизованому проектуванні технологічної оснастки;

– отримав подальший розвиток методологічний підхід параметричної оптимізації структурних елементів гнучких ВП шляхом мінімізації масогабаритних характеристик компонувань ВП, що дозволило вдосконалити технологічні показники ВП;

– аналітичні та експериментальні дослідження на прикладі обробки важелів довели доцільність застосування гнучких ВП для обробки деталей на багатоцільових верстатах із ЧПК в умовах багатомономенклатурного виробництва з метою скорочення підготовчо-заключної складової норми часу, пов'язаної з переналагодженням ВП на обробку деталей заданої номенклатури.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудівної галузі полягає у розробленні підходу до проектування ТП для багатокоординатної обробки деталей типу важелів, що доцільно застосовувати на підрядних та ремонтних підприємствах автотракторної галузі, що мають характер серійного виробництва. Розроблено компонування ВП (патент України № 98925), підготовлено комплект конструкторсько-технологічної документації та виготовлено дослідний зразок ВП, що дозволяє реалізувати багатокоординатну обробку деталей типу важелів та впроваджений на підприємствах автотракторної галузі. Запропоновано функціональну залежність точності ВП від ступеня гнучкості, яку доцільно застосувати у системах автоматизованого проектування ВП та інформаційно-пошукових системах. Основні результати роботи впроваджено у виробництво на ПАТ «Роменський завод «Тракторозапчастина» (м. Ромни) та у навчальний процес підготовки студентів Сумського державного університету за освітньо-кваліфікаційним рівнем «бакалавр» при підготовці курсів «Технологічна оснастка: комп'ютерні технології проектування», «Експериментальні методи дослідження технологічних процесів», а також при підготовці науково-дослідних робіт і кваліфікаційних робіт студентів.

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 багатокординатних 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 багатокординатної обробки при достатній інструментальній доступності.

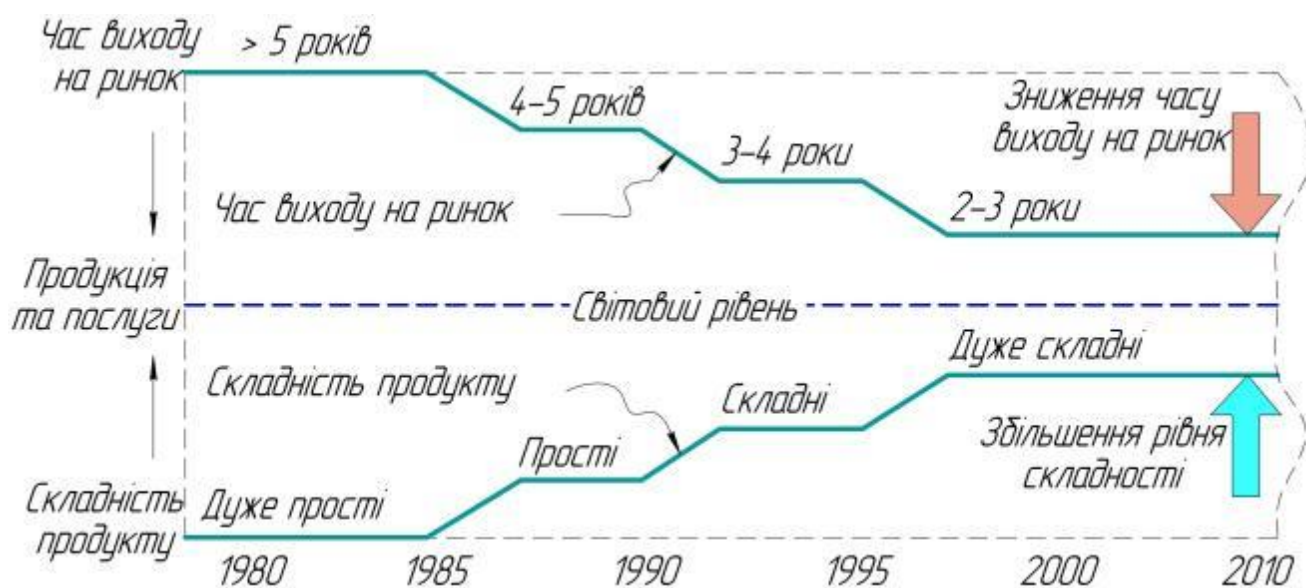


Рисунок 1.1 – Сучасна тенденція зміни рівня складності продукції та часу її виходу на ринок

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 компонентування 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;
- б) 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. Е. Eraslan і М. 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.

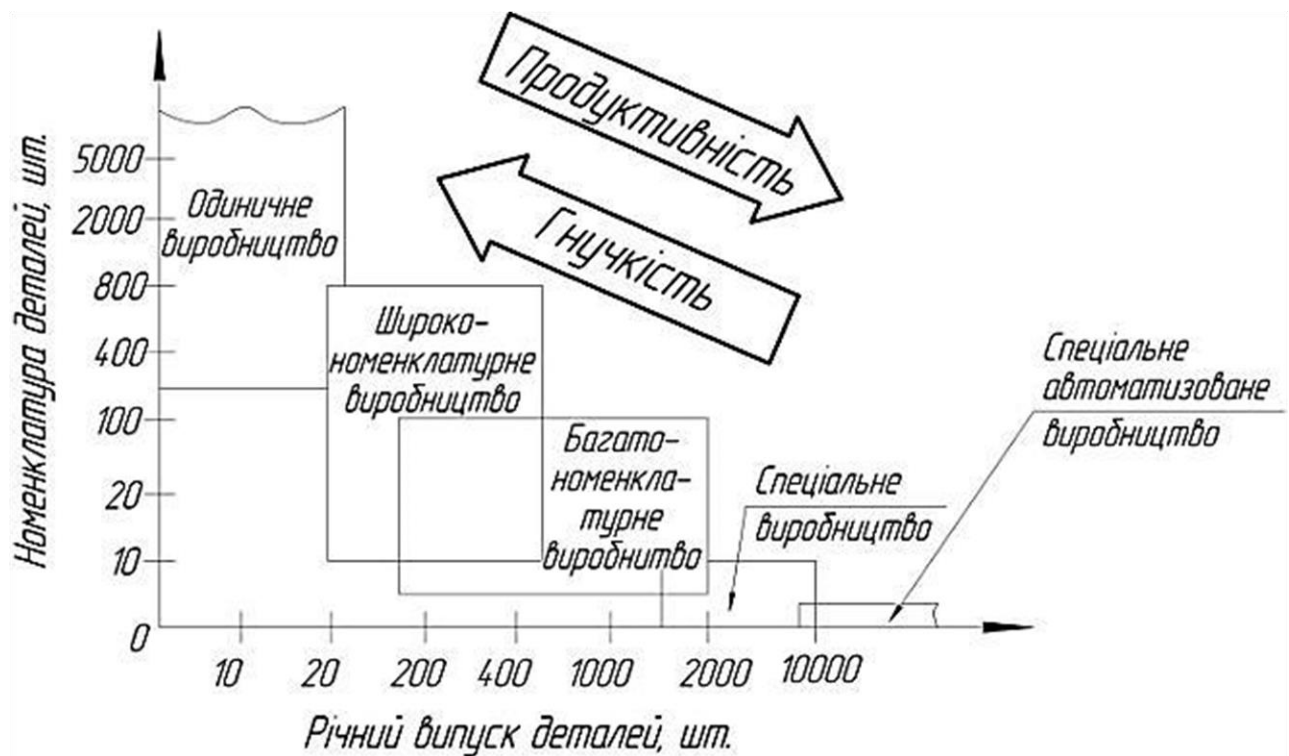


Рисунок 1.2 – Графічне представлення протиріччя між гнучкістю та продуктивністю

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. Проскуракова 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. Проскураковим 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 свідомство 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 $\epsilon_{ГП}$ [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:

$$\Delta_{\Sigma_{ст}} = \sqrt{\varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_{з}^2 + \varepsilon_{з.м}^2 + \varepsilon_n^2 + \varepsilon_{en}^2 + \varepsilon_e^2 + \varepsilon_i^2 + \varepsilon_{ei}^2}, \quad (1.8)$$

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 вимірювальної 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 устанавлення компонентів системи, а саме:

ε_3 – похибка закріплення заготовки, яка виникає від сили затиску;

ε_{3m} – 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_{3n} – 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 устанавлювальних або напрямних елементів ВП ε_{3n} істотно впливає на підсумкову похибку, рекомендується призначити допуск на спрацювання цих елементів. Цей допуск має приблизно дорівнювати допуску оброблюваної поверхні. Запас на спрацювання ε_{3n} можна додати до похибки зміщення заготовки ε_{3m} , 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:

$$\Delta_\Sigma = \sqrt{K_1 \varepsilon_\delta^2 + \varepsilon_3^2 + (\varepsilon_{3M} + \varepsilon_{3H})^2 + \varepsilon_n^2 + \varepsilon_{6n}^2 + \varepsilon_\delta^2 + \varepsilon_i^2 + \varepsilon_{\delta i}^2} + K_2 \Delta_M, \quad (1.10)$$

де $K_1 = 0,8 - 0,85$ – коефіцієнт зменшення похибки базування (ε_δ) 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 призначати 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.Є. 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. Rajuaguru [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 переналагоджуваних 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 змодельовали 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. Nou 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 установлення, але і інтенсивність зношування та термін експлуатації ВП, що як правило, не перевищує 5 років. Розрахунок похибки, пов'язаної з установленням деталі при зношуванні базових елементів ВП для будь-якого заданого розміру може бути представлено, як визначення найбільшої зміни цього розміру, тому що установлювальний елемент може зайняти різне положення відносно різального інструмента. При цьому визначення похибки зношування при відомих значеннях похибок установлювальних елементів зводиться до вирішення геометричної задачі. Зношування установлювальних 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 багатокоординатної 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 багатокоординатної 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 багатокоординатних верстатах.

Запропонувати та розробити конструкцію ВП, здатну забезпечити установлення деталей у певному діапазоні розмірів при забезпеченні необхідної точності та можливості багатокоординатної 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 багатокординатної обробки, що у останні роки набуває широкого застосування у зв'язку з розвитком нових технологій у верстатобудуванні. За рахунок інтенсифікації ТП, багатокординатної 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

Існуюча класифікація важелів лише за конструкторськими ознаками класифікатора ЄСКД [73] не відображає технологічні аспекти, які особливо важливі при проектуванні виробничих процесів. Тому у новій класифікації необхідно розглянути конструкції важелів, поширених у автомобілях, з урахуванням технологічних аспектів їх виробництва. На основі комплексного аналізу деталей типу важелів, що виконувався на основі класифікатора деталей ЄСКД та основних технологічних ознак, запропоновано конструкторсько-технологічну класифікацію (рис. 2.1), у якій враховано всі можливі конструкції важелів, які можуть зустрічатися в машинобудуванні.

За ознаками розробленої класифікації, таких як «За кількістю плечей» важелі можуть бути одноплечі, двоплечі, з трьома та більше плечами, що визначає складність конструкції та сферу використання. Плечі важелів розташовуються паралельно, перпендикулярно або під деяким довільним кутом із відношенням довжин плечей менше 0,5 або більше 0,5, що також визначає складність конструкції та схему базування.

Важелі можуть мати такі найбільш поширені функціональні елементи як вилка, хомут або будь-який інший елемент (наприклад, елемент зубчастого зачеплення у вигляді сектора), або ж не мати в конструкції функціональних елементів взагалі. Як правило, важелі мають одну або декілька конструкторських баз, які можуть бути паралельні або непаралельні одна до одної, що принципово визначає схему базування при механічній обробці. Базові поверхні у поперечному перерізі можуть бути круглими, некруглими або комбінованими, що обумовлює форму базових поверхонь установлювальних елементів. За довжиною базових

поверхонь деталі класифікуються на важелі з довгими ($l/d > 1$) та короткими ($l/d < 1$) базовими поверхнями, що принципово визначає спосіб їх базування при механічній обробці та конструкцію верстатного пристрою (ВП).

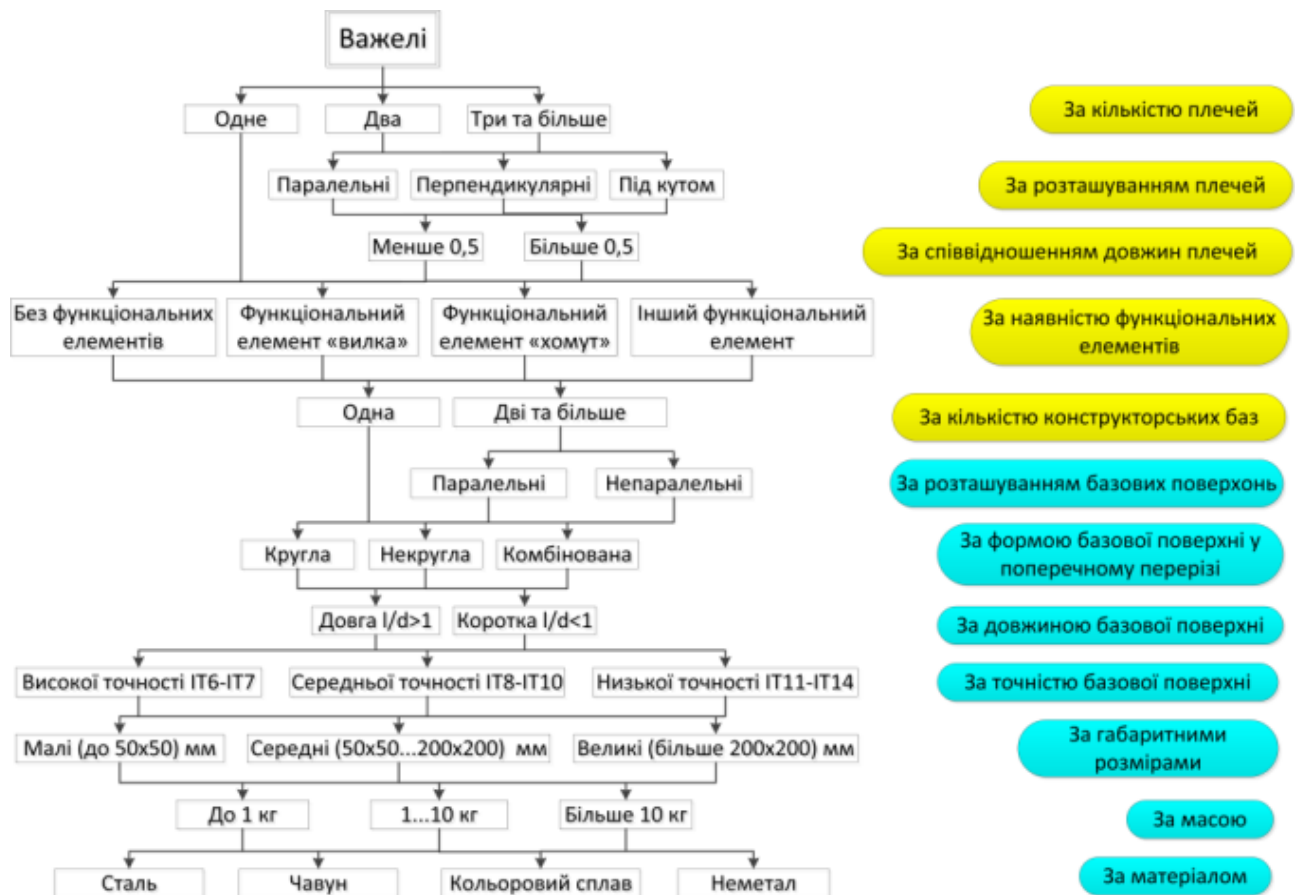


Рисунок 2.1 – Конструкторсько-технологічна класифікація важелів

Залежно від службового призначення важелі поділяються на важелі з високою (IT6–IT7), середньою (IT8–IT10) та низькою (IT11–IT14) розмірною точністю базових поверхонь, якими, як правило, є отвори та торцеві поверхні. Виготовлення базових поверхонь із високою точністю при інших рівних умовах гарантує більш надійну та довговічну роботу деталі та виробу в цілому. Відстані між осями отворів основних і допоміжних баз важелів повинні відповідати розрахунковим значенням, а відхилення залежать від заданої точності та знаходяться у діапазоні від $\pm 0,025$ до $\pm 0,1$ мм. Похибка форми не повинна перевищувати 40–60% поля допуску на відповідний розмір. Точність взаємного розташування поверхонь важелів також відіграє важливу роль. Так, паралельність

осей отворів відповідає допустимому відхиленню $(0,05-0,3)/100$ мм, а перпендикулярність отворів до плоских поверхонь важелів – $(0,1-0,3)/100$ мм.

За габаритними розмірами важелі поділяються на малі (менше 50x50 мм), середні (50x50–200x200 мм) та великі (більше 200x200 мм), що визначає габаритні розміри ВП та необхідний робочий простір верстата.

За масою важелі класифікуються на легкі (менше 1 кг), середні (1–10 кг) та важкі (більше 10 кг), що також визначає в певній мірі технологічні характеристики верстатів, на яких буде виконуватися механічна обробка.

Важелі виготовляють зі сталей марок 35, 40, 45, 40Г, 50Г, 40Х, 50Х та ін., чавунів марок СЧ20, СЧ30, КЧ35-10 та ін., легких кольорових сплавів марок АС9, Д16Т, а також неметалевих матеріалів [92], що впливає на вибір різального інструменту та режимів різання при механічній обробці.

На основі розробленої класифікації запропоновано структурний код, який характеризує будь-який важіль за конструкторсько-технологічними ознаками, що позначені кодovими літерами на класифікації. Він може бути використаний у системах автоматизованого проектування ВП та інформаційно-пошукових системах із метою вибору ВП для важеля певної конструкції. Структурна формула коду, яка відображає 12 класифікаційних ознак, наведена на рис. 2.2.

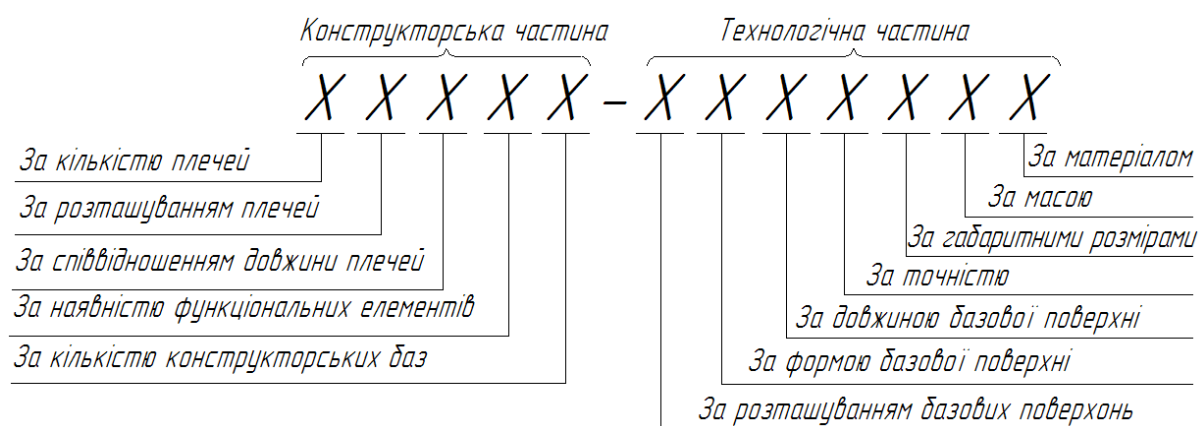


Рисунок 2.2 – Структура конструкторсько-технологічного коду деталей типу важелів

Приклад ілюстрації конструкторської та технологічної частини структурного коду наведено на рис. 2.3 а, б відповідно.

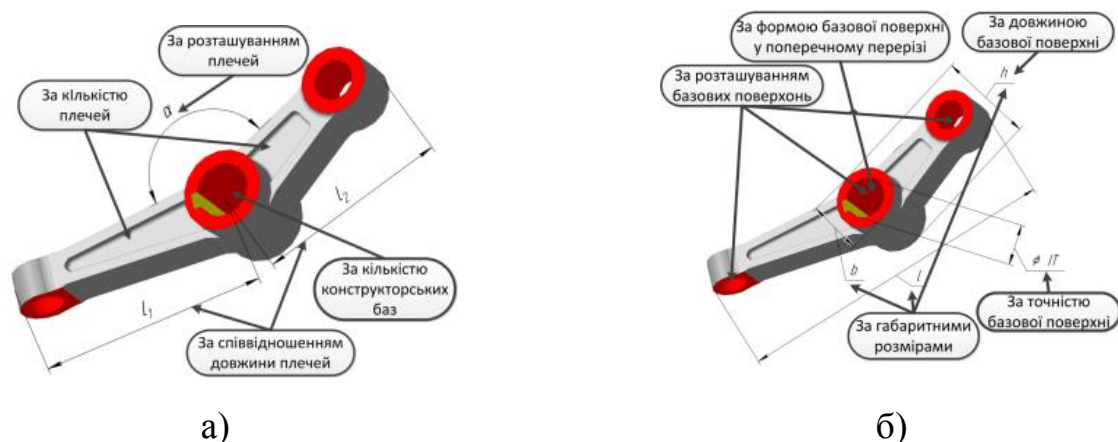


Рисунок 2.3 – Приклад ілюстрації частин структурного коду:
а – конструкторської; б – технологічної

На основі аналізу конструкцій важелів, що зустрічаються в автомобілях різних моделей (рис. 2.4), встановлена типова конструкція важеля (рис. 2.5), яка використовується в механізмах передньої підвіски автомобіля.

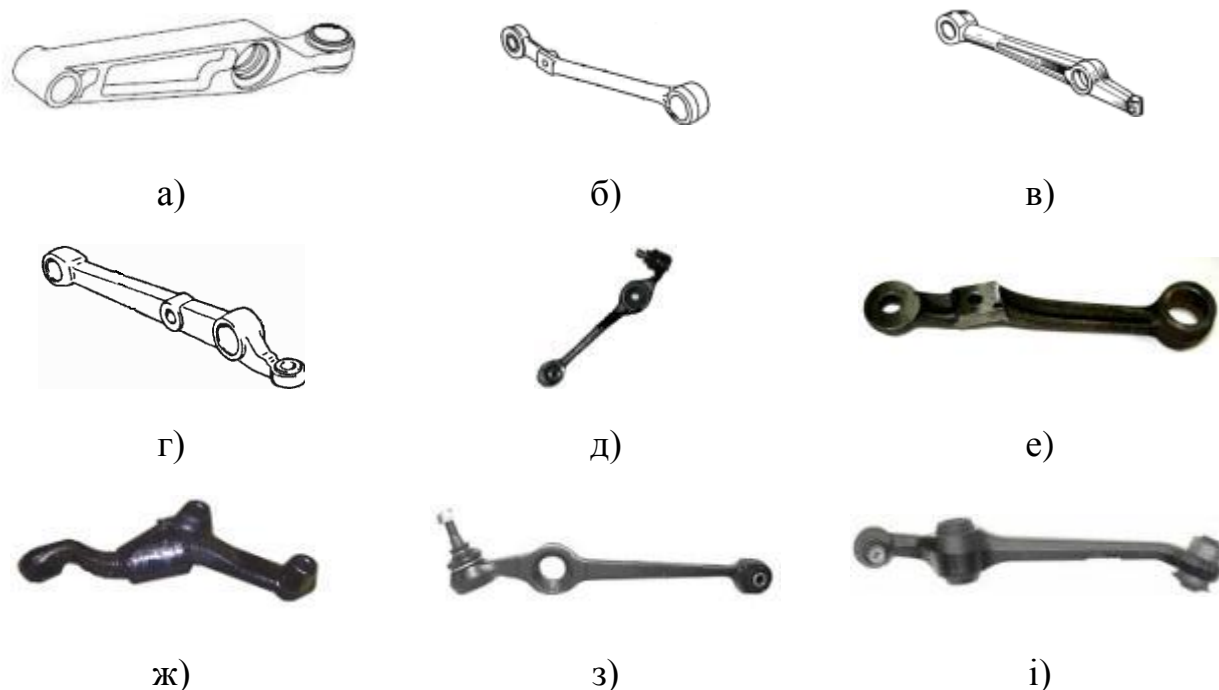


Рисунок 2.4 – Важелі передньої підвіски автомобілів:
а – CHANA Benni; б – ГАЗ-31029; в – Mercedes E200;
г – ВАЗ 2108-09; д – Ford Escort; е – ГАЗ 3102;
ж – ВАЗ 2121; з – LIFAN LF-7162 Solano; і – Hyundai Accent

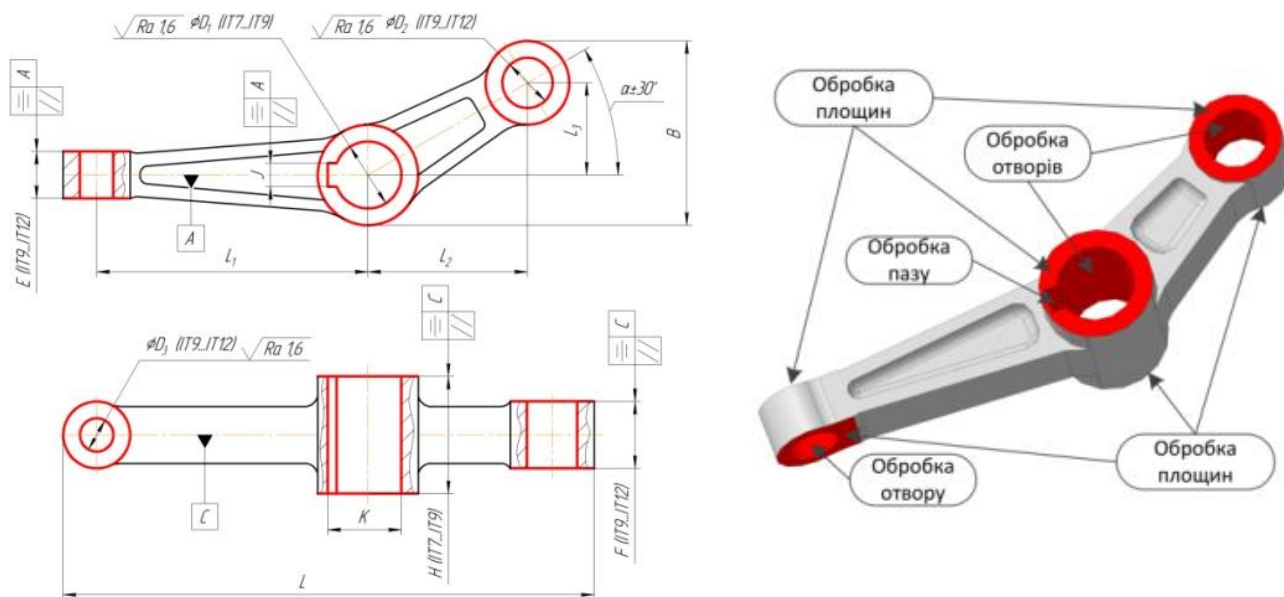


Рисунок 2.5 – Типова конструкція важеля

Важіль даної конфігурації входить у транспортний засіб будь-якого призначення, що містить механізм повороту коліс, будь то легковий чи вантажний автомобіль, трактор або автобус, та може відрізнятися лише типорозмірами і незначною зміною форми.

Особливістю даної деталі є наявність двох плечей, як правило, нерівної довжини, центрального базового отвору більшого діаметра та двох менших отворів, що можуть бути розташовані під кутом до нього, та один до одного.

Деталі даного типу є дуже важливими елементами конструкції автомобіля, що обумовлює собівартість їх виготовлення, оскільки надійність важелів безпосередньо впливає на безпеку під час руху транспортного засобу. Наприклад, такий недолік підвіски автомобіля як порушення кута установлення передніх коліс та деформації важелів підвіски можуть призвести до втрати керування та виникнення аварійної ситуації на дорозі. Тому питанню якості виготовлення деталей типу важелів треба приділяти особливу увагу та чітко дотримуватися порядку операцій ТП.

2.2 База даних елементарних поверхонь різального інструменту

Якість роботи будь-якого виробу значно залежить від технології виготовлення його складових елементів. Більшість деталей типу важелів мають складну геометричну форму, що викликає певні труднощі при базуванні та закріпленні заготовок на операціях механічної обробки. Традиційно для установлення заготовок застосовуються спеціальні або гнучкі ВП (як правило, УЗП) [12], що забезпечує задану точність обробки поверхонь, але збільшує трудомісткість і вартість виготовлення. Таким чином актуальним є аналіз типового ТП виготовлення важелів та виявлення можливості для оптимізації ТП з урахуванням сучасних тенденцій у механічній обробці, а також функціонально-технологічних можливостей сучасного обладнання.

Типовий ТП обробки базуючих поверхонь різального інструменту (табл. 2.1) складається, як правило, з 10 операцій, з яких 8 – операції механічної обробки [93]. Схеми установлення заготовок на операціях механічної обробки наведені на рис 2.6–2.12.

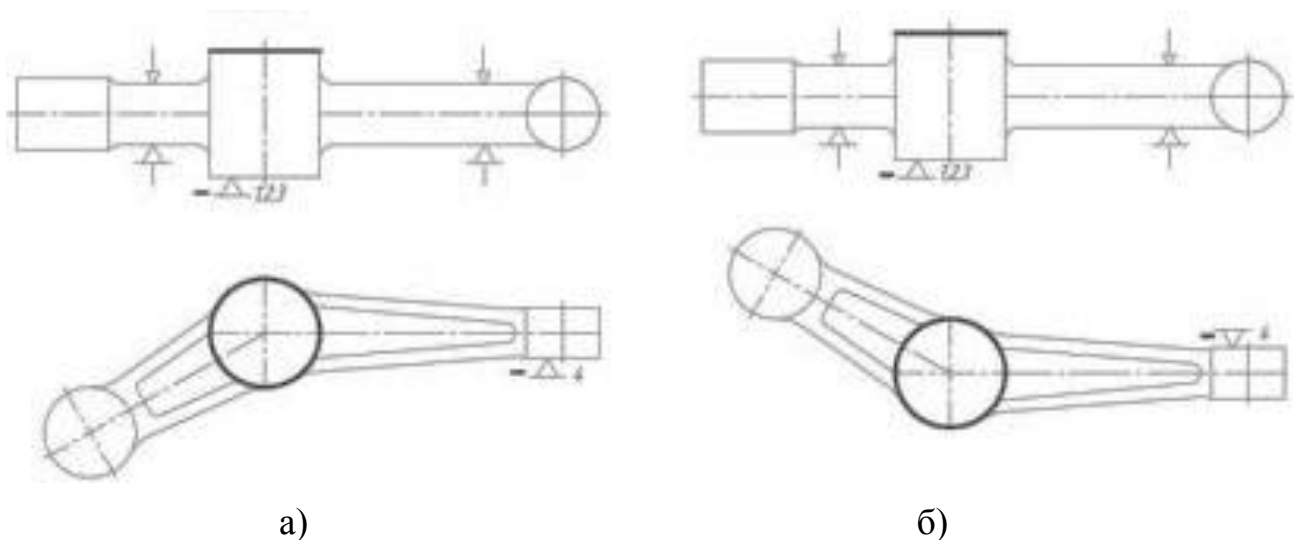
На всіх операціях механічної обробки здійснюється переустановлення заготовки зі зміною схеми базування, як між операціями, так і на різних установах у межах конкретної операції, що призводить до накопичення похибок установлення в цілому, та як наслідок зниження точності взаємного розташування поверхонь деталі.

При обробці на кожній операції проводиться обов'язкова вивірка положення деталі при аналогічній схемі базування, що призводить до суттєвого збільшення допоміжного часу, а, отже, збільшенню собівартості деталі, що в умовах сучасного виробництва неприпустимо.

Методи проектування ТП, засновані в більшості на можливостях металорізального обладнання 60–70-х років ХХ ст., яке не дозволяло оброблювати декілька поверхонь, розташованих у різних площинах багатьма інструментами, змушувало технологів розробляти ТП із великою кількістю операцій (принцип диференціації операцій). Підтвердженням цього є обробка

бобишок та взаємно перпендикулярних отворів, що виконують функції допоміжних конструкторських баз.

Враховуючи багатомономенклатурне виробництво, а також можливості сучасного металорізального обладнання, що дозволяє виконувати комплексну обробку деталей, необхідно змінювати підходи до проектування ТП обробки деталей, прагнучи до інтенсифікації процесів механічної обробки, а основним резервом є розроблення та впровадження гнучких ВП, які характеризуються високим ступенем гнучкості та дозволяють реалізувати принципово нові схеми установаження важелів, забезпечуючи максимальну інструментальну доступність. Для досягнення цієї мети, враховуючи можливості сучасного металорізального обладнання, запропоновано інтенсифікувати ТП (принцип концентрації операцій) шляхом об'єднання операцій 05–30 в одну – комплексну на оброблювальному центрі із ЧПК (рис. 2.7), а отже, скоротити технологічний процес на 5 операцій (рис. 2.8). Обробка важеля на комплексній із ЧПК операції виконується на трьох позиціях (рис.2.9) [92].



а) б)
Рисунок 2.6 – Схема установаження заготовки на вертикально-фрезерній 05 операції: а – установ А; б – установ Б

Таблиця 2.1 – Структура типового технологічного процесу обробки важеля

№ операції	Найменування операції	Установи	Схема базування на операції (установі)	Зміст операції (установа)
1	2	3	4	5
05	Вертикально-фрезерна	А	Необроблений торець бобишки головного отвору (рис. 2.6 а)	Фрезерування торця бобишки головного отвору з припуском під шліфування
		Б	Оброблений торець бобишки головного отвору (рис. 2.6 б)	Фрезерування торця бобишки головного отвору з припуском під шліфування
10	Вертикально-свердлильна	–	Оброблений торець бобишки головного отвору (рис. 2.7)	Свердління та зенкерування головного отвору з припуском під розточування
15	Координатно-розточувальна	–	Оброблений торець бобишки головного отвору (рис. 2.8)	Розточування головного отвору до розміру згідно з кресленням
20	Вертикально-фрезерна	А	Оброблений торець головного отвору та головний отвір (рис. 2.9а)	Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному, до розміру згідно з кресленням
		Б	Оброблений торець головного отвору та головний отвір (рис. 2.10 б)	Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному, до розміру згідно з кресленням
25	Вертикально-свердлильна	–	Оброблений торець головного отвору та головний отвір (рис. 2.11)	Свердління та розгортання допоміжного отвору, розташованого паралельно головному, до розміру згідно з кресленням

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5
30	Горизонтально-розточувальна	А	Оброблений торець головного отвору, головний отвір та оброблений допоміжний отвір (рис. 2.12 а)	Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному, до розміру згідно з кресленням, свердління та розгортання даного отвору до розміру згідно з кресленням
		Б	Оброблений торець головного отвору, головний отвір та оброблений допоміжний отвір (рис. 2.12 б)	Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному, до розміру згідно з кресленням
35	Довбальна	–	Оброблений торець головного отвору та допоміжний отвір, розташований паралельно головному (рис. 2.13)	Довбання шпонкового паза в головному отворі
40	Термічна обробка	–		Гартування важеля до досягнення необхідних механічних властивостей згідно з технічними вимогами креслення
45	Плоскошліфувальна а	А	Оброблений торець головного отвору, головний отвір та оброблений допоміжний отвір (рис. 2.14 а)	Шліфування торцю бобишки головного отвору до розміру згідно з кресленням
		Б	Оброблений торець головного отвору, головний отвір та оброблений допоміжний отвір (рис. 2.14 б)	Шліфування торцю бобишки головного отвору до розміру згідно з кресленням
50	Технічний контроль	–		Остаточний контроль точності розмірів і параметрів якості поверхонь

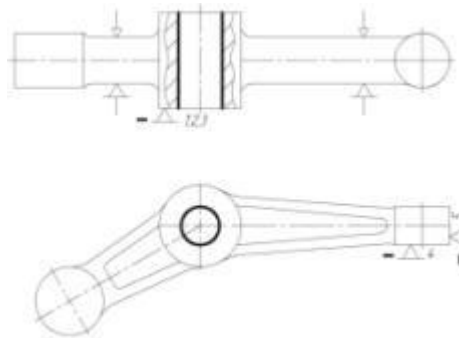
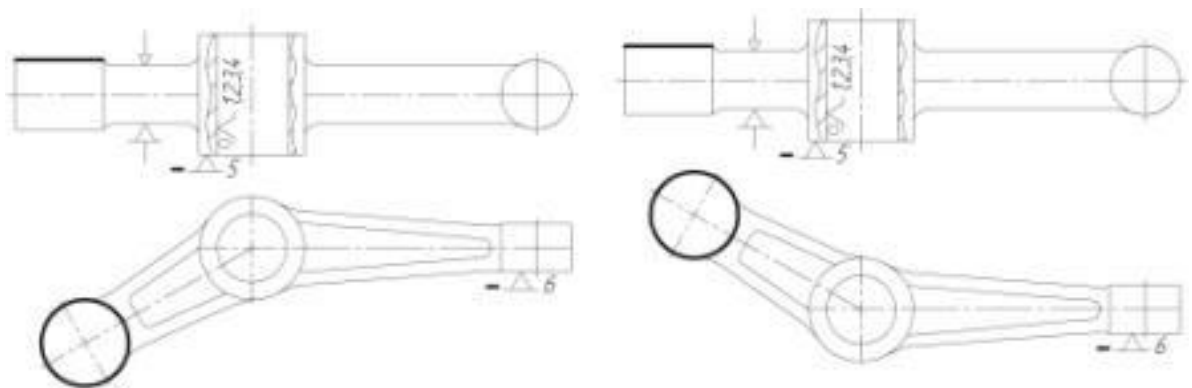


Рисунок 2.7 – Схема базування заготовки на вертикально-свердлильній 10 та координатно-розточувальній 15 операціях



а)

б)

Рисунок 2.8 – Схема базування заготовки на вертикально-фрезерній 20 операції

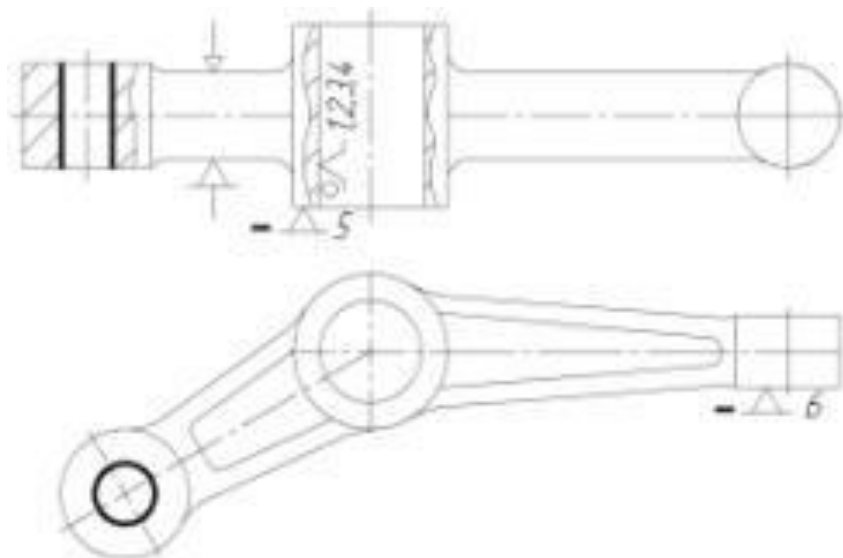


Рисунок 2.9 – Схема базування заготовки на вертикально-свердлильній 25 операції

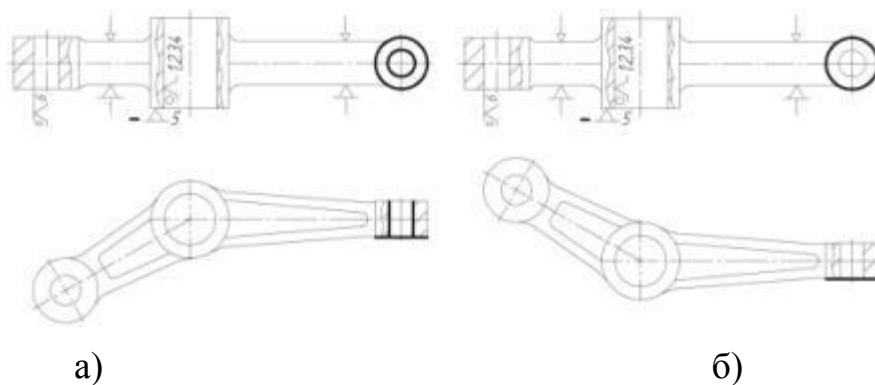


Рисунок 2.10 – Схема базування заготовки на горизонтально-фрезерній 30 операції:

а – установ А; б – установ Б

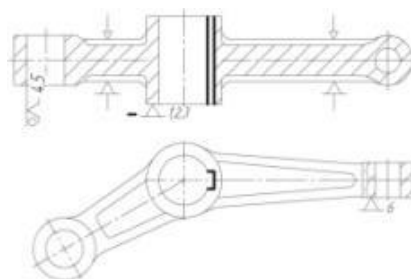


Рисунок 2.11 – Схема базування заготовки на довбальній 35 операції

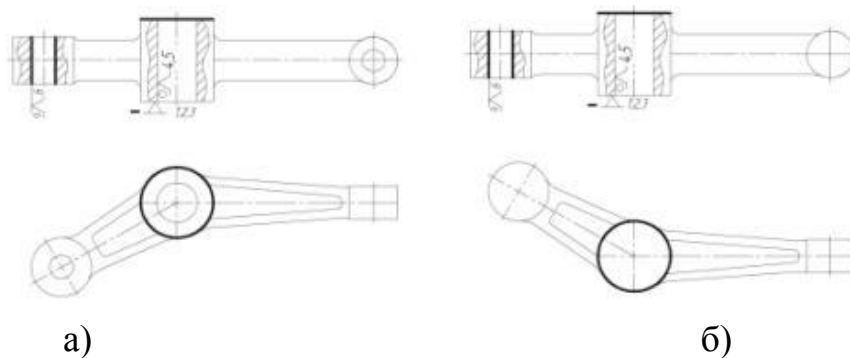


Рисунок 2.12 – Схема базування заготовки на плоскошліфувальній 45 операції:

а – установ А; б – установ Б

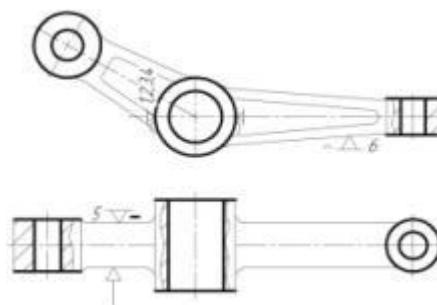


Рисунок 2.13 – Схема базування заготовки на комплексній із ЧПК операції

Інші операції типового ТП, що включають термічну обробку, довбальну та плоскошліфувальну операції не є доцільним змінювати або об'єднувати, оскільки це різні та несумісні з іншими методи обробки.

Для кількісного порівняння типового та прогресивного ТП обробки важеля виконано розрахунок норм часу на операції, які в обох ТП не співпадають, тобто операції 05–30 типового та операції 05 прогресивного ТП відповідно. На даних операціях в обох ТП виконуються всі свердлильно-фрезерно-розточувальні операції згідно з технічними вимогами креслення.

Розрахунок режимів різання та норм часу виконувався для важеля з урахуванням креслення заготовки (додаток Б). Прийнято, що величина партії деталей $N = 50$ шт. (як найбільш розповсюджена для багатомоделного виробництва), а різальні інструменти та режими різання є аналогічними для типового та прогресивного ТП. Порівняльний аналіз норм часу для реалізації типового та нормативного ТП наведено на рис. 2.14.



Рисунок 2.14 – Порівняння маршрутів обробки деталі «Важіль»:

а – типовий ТП; б – запропонований ТП

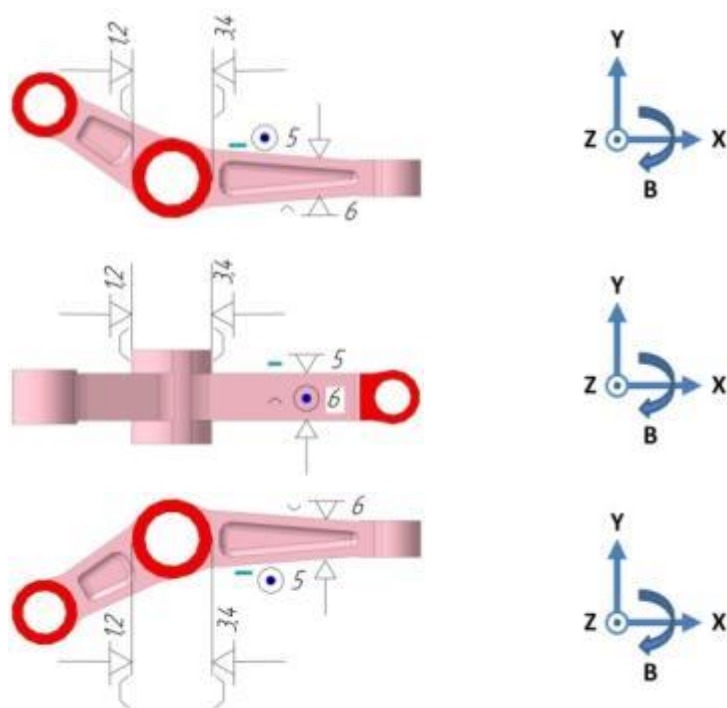
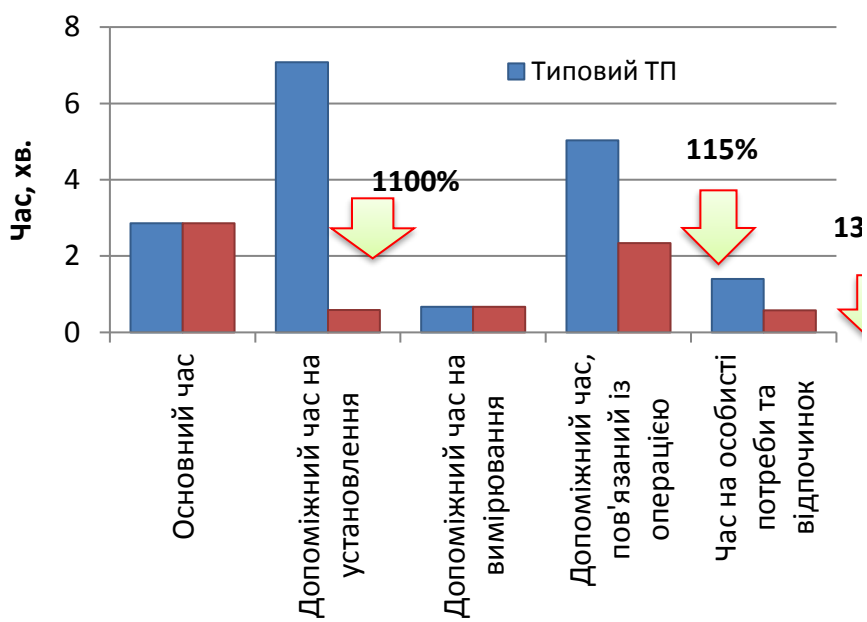


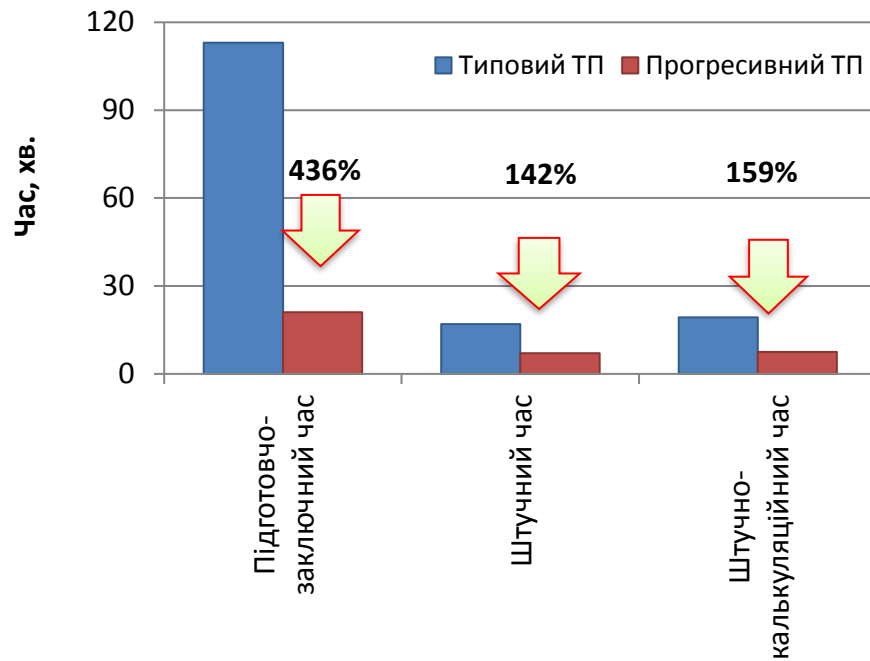
Рисунок 2.15 – Позичії обробки важеля на комплексній операції на оброблювальному центрі з ЧПК



а)

Рисунок 2.16 – Норми часу:

а – на переходи, що виконуються для кожної деталі;



б)

Рисунок 2.16 – Норми часу:

б – на партію деталей

Діаграми, побудовані на основі розрахунків норм часу, показали, що:

- основний час для обох ТП однаковий, оскільки застосовуються однакові різальні інструменти та режими обробки;
- допоміжний час на установлення у типовому ТП більш трудомісткий, бо потребує велику кількість установлень та переустановлень заготовки при переході від операції до операції на відміну від одного установлення у прогресивному ТП;
- допоміжний час на вимірювання в обох ТП аналогічний, оскільки кількість поверхонь для вимірювання однакова;
- норми допоміжного часу, пов'язаного з операцією, та часу на особисті потреби та відпочинок, а також підготовчо-заключний час в типовому ТП більші, ніж у прогресивному через більшу кількість операцій, та робочих місць;

– штучний час обробки однієї деталі в типовому ТП приблизно в двічі більший ніж у прогресивному, бо включає в себе всі попередні норми часу, окрім підготовчо-заключної складової.

– штучно-калькуляційний час обернено пропорційно залежить від кількості деталей у партії, тому для невеликих партій він суттєво зростає порівняно зі штучним, що досить наглядно представлено у даному розрахунку та на діаграмі.

У результаті об'єднання операцій та зменшення кількості установлень порівняльний аналіз ТП за трудомісткістю показав зменшення трудомісткості у запропонованому ТП, а саме за допоміжним часом на установлення – 1100%; за допоміжним часом, пов'язаним з операцією – 115%; за часом на обслуговування робочого місця – 133%; за підготовчо-заключним часом – 436%; за штучним часом – 142%; за штучно-калькуляційним часом – 159% [92].

Аналіз показав, що майже всі норми часу типового ТП перевищують відповідні норми прогресивного ТП, що обумовлено великою кількістю операцій та допоміжних переходів. Тобто є сенс зменшувати кількість операцій та допоміжних переходів за рахунок використання можливостей прогресивного сучасного обладнання у поєднанні з гнучкими ВП, що забезпечують максимально можливу інструментальну доступність.

2.3 Автоматизоване проектування модульної технологічного оснащення

Для реалізації схеми базування на комплексній із ЧПК операції запропоновано переналагоджуваний установлювальньо-затискний модуль для обробки деталей типу важелів (рис. 2.26), на який отримано патент України на корисну модель № 98925 [94].

Базування та закріплення заготовки важеля 1 здійснюється шляхом переміщення призм 4 та повзунів 2 і 3 у пазах за рахунок обертання поперечних 5 та поздовжнього 6 гвинтів. Для орієнтації у горизонтальній площині в конструкції передбачений упор 7. Додаткове закріплення здійснюється прихватом 8.

Переналагодження на інший типорозмір здійснюється шляхом зміни відстані між призмами 4 та повзунами 2 і 3, що дозволяє встановлювати деталі з різним діаметром центральної бобишки важеля 26–42 мм та товщиною 13–21 мм (рис. 2.18).

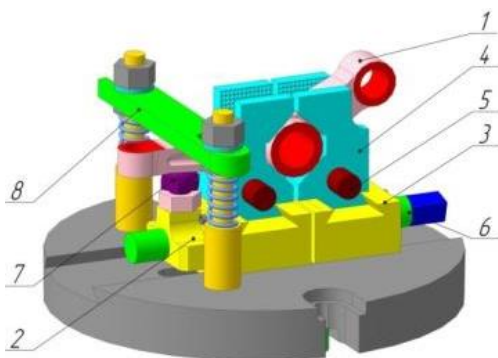


Рисунок 2.17 – Переналагоджуваний установлювально-затискний модуль для обробки деталей типу важелів

Так як переналагоджуваний установлювально-затискний модуль для обробки деталей типу важелів відноситься до ВП системи УЗПП, то він може бути встановлений як на столі верстата, так і на базових плитах, що входять до різних комплектів ВП.

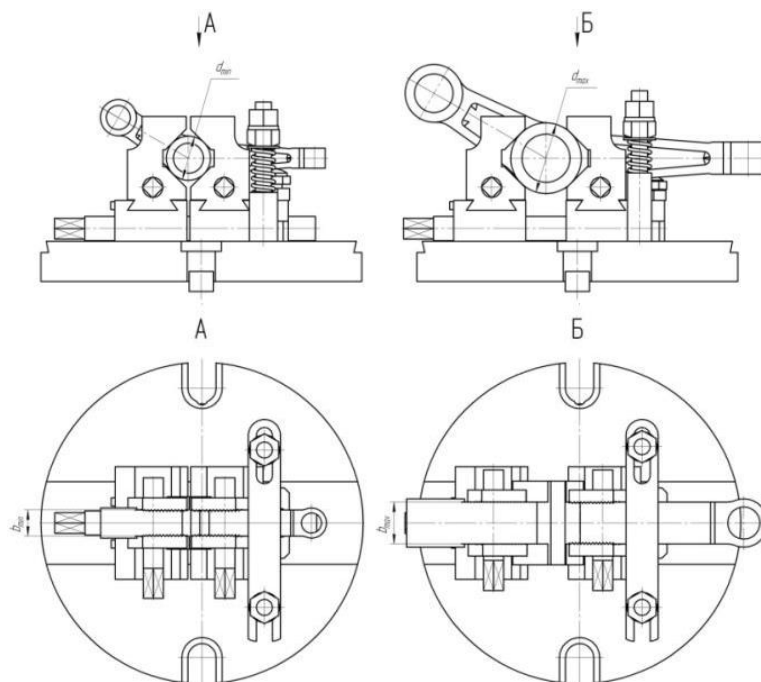


Рисунок 2.18 – Граничні положення регульованих елементів переналагоджуваного установлювально-затискного модуля

Таке технічне рішення у сукупності з обертовим столом верстата дозволяє виконати всі свердлильно-фрезерно-розточувальні операції при незмінному закріпленні заготовки на одній комплексній операції, виконуваний на оброблювальному центрі з ЧПК. Ступінь гнучкості для даної конструкції запропонованого ВП $G_{ВП} = 0,9$ розраховано за формулою (2.1) при кількості встановлюваних типорозмірів важелів 10 одиниць. У даному випадку ступінь гнучкості залежить лише від кількості типорозмірів встановлюваних заготовок, що в умовах середньосерійного виробництва з рештою чинить найбільший вплив на нього (рис. 2.6). Згідно з запропонованою класифікацією за рівнями переналагодження ВП відноситься до категорії переналагоджуваних (табл. 2.3).

Недоліком конструкцій ВП, що використовуються в типовому ТП [95] є наявність великої кількості деталей, що знижують жорсткість конструкції в цілому та можливість установа в даному пристрої деталей лише одного типорозміру, що обумовлено неможливістю швидкого переналагодження опор на плиті через дискретність отворів плити. Невеликий хід затискного елемента не дозволяє встановлювати деталі у широкому діапазоні розмірів.

Універсально-збірні ВП для фрезерування бобишок важелів [95], які складені із елементів системи УЗП, мають поздовжні та поперечні Т-подібні пази, що суттєво знижує жорсткість конструкції, що може погіршувати якість виготовлення деталі.

Враховуючи даний факт, та можливість установа певної кількості типорозмірів важелів, доцільність застосування запропонованої конструкції переналагоджуваного установлювально-затискного модуля очевидна. Проте для порівняння та аргументації доцільності розроблення нової конструкції, перевірки забезпечення необхідної точності обробки необхідно виконати ряд досліджень.

Даний етап роботи передбачає встановлення можливості забезпечення обробки у ВП з високим ступенем гнучкості при дотриманні параметрів розмірної точності, використовуючи методи математичного моделювання на прикладі ВП для обробки деталей типу важелів.

Сформульована робоча гіпотеза припускає, що «підвищення ступеня гнучкості ВП у певних межах дозволяє отримати деталі у межах допусків, що задані на кресленні». Для отримання математичної моделі задамося обмеженнями, що не суперечать фізичним законам:

- ступінь гнучкості змінюється у діапазоні $0 \leq G \leq 1$;
- переміщення елементів спеціального ВП $\Delta_0 = \Delta(0)$;
- у ВП із максимально можливим ступенем гнучкості переміщення асимптотично прямують до нескінченності: $\Delta(1) \rightarrow \infty$;
- збільшення гнучкості ВП призводить до збільшення переміщення: $\frac{\partial \Delta}{\partial G} > 0$.

Представимо вищеписані обмеження графічно (рис. 2.19).

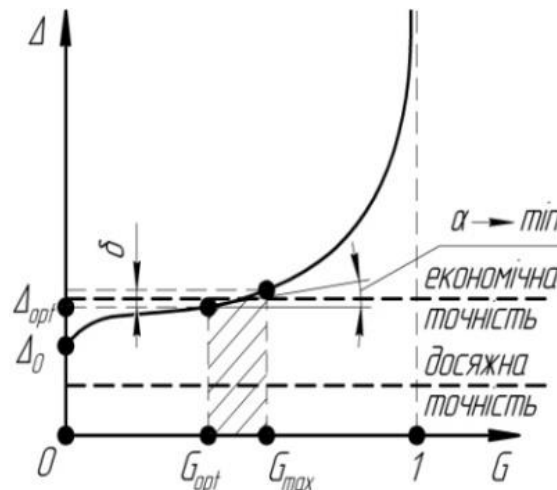


Рисунок 2.19 – Графічне представлення гіпотези залежності «точність-гнучкість»

Подібну функцію можна описати за допомогою наступної залежності:

$$\Delta(G) = \frac{\Delta_0}{(1 - G^m)^n}, \quad (2.2)$$

де $\Delta_0 = \Delta(0)$ – переміщення елементів спеціального ВП зі ступенем гнучкості $G = 0$;

m, n – показники ступеня функціональної залежності, які визначаються за експериментальними даними.

Процес отримання математичної моделі.

Для мінімізації похибки апроксимації експериментальних точок (G_i, Δ_i) аналітичною залежністю (2.2) визначаємо сумарне квадратичне відхилення:

$$R_0(m, n) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\Delta_0}{(1 - G_i^m)^n} - \Delta_i \right]^2 \rightarrow \min \quad (2.3)$$

Задача визначення параметрів m, n за умовою (2.2) є нелінійною і не має точного аналітичного розв'язку, тому виконуємо процедуру її зведення до квазілінійної відносно показників m та n по чергово. Для подальших дій виконуємо алгебраїчні перетворення рівняння (2.2) для експериментальних точок (G_i, Δ_i) :

$$1 - G_i^m = \left(\frac{\Delta_0}{\Delta_i} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (2.4)$$

$$(1 - G_i^m)^n = \frac{\Delta_0}{\Delta_i}, \quad (2.5)$$

Виконуючи процес логарифмування та визначення сумарного квадратичного відхилення кожного з рівнянь (2.4) та (2.5), отримаємо:

$$R_1(m, n) = \sum_{i=1}^N \left\{ m \cdot \ln G_i - \ln \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{\Delta_i}{\Delta_0} \right)^{\frac{1}{n}}} \right] \right\}^2 \rightarrow \min \quad (2.6)$$

$$R_2(m, n) = \sum_{i=1}^N \left[n \cdot \ln(1 - G_i^m) + \ln \frac{\Delta_i}{\Delta_0} \right]^2 \rightarrow \min \quad (2.7)$$

Шукані параметри m, n визначаються з умов рівності нулю градієнта сумарної квадратичної похибки:

$$\frac{\partial R_1}{\partial m} = \sum_{i=1}^N 2 \cdot \left\{ m \cdot \ln G_i - \ln \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{\Delta_i}{\Delta_0} \right)^{\frac{1}{n}}} \right] \right\} \cdot \ln G_i = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial R_2}{\partial n} = \sum_{i=1}^N 2 \cdot \left[n \cdot \ln(1 - G_i^m) + \ln \frac{\Delta_i}{\Delta_0} \right] \cdot \ln(1 - G_i^m) = 0 \quad (2.9)$$

Отримані рівняння (2.8) та (2.9) є лінійними відносно m та n , а величини останніх становлять

$$m = \frac{\sum_{i=1}^N \ln G_i \cdot \ln \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{\Delta_i}{\Delta_0} \right)^{\frac{1}{n}}} \right]}{\sum_{i=1}^N \ln^2 G_i} \quad (2.10)$$

$$n = - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(1 - G_i^m) \cdot \ln \frac{\Delta_i}{\Delta_0}}{\sum_{i=1}^N \ln^2(1 - G_i^m)} \quad (2.11)$$

Сукупність виразів (2.10) та (2.11) утворює систему двох нелінійних алгебраїчних рівнянь відносно m та n :

$$\begin{cases} m = m(n); \\ n = n(m), \end{cases} \quad (2.12)$$

Дана система (2.12) може бути розв'язана за допомогою процедури простих ітерацій на основі отриманих експериментальних значень величин ступеня

гнучкості та переміщень. Блок-схема ітераційної процедури представлена на рис. 2.29.

Умові досягнення необхідної точності, виходячи з залежності (2.2), можуть відповідати кілька компонентів ВП з різною гнучкістю. Для визначення діапазону гнучкостей $[G_{min}, G_{max}]$, для якого забезпечується задана (оптимальна) точність застосовуються 2 підходи.

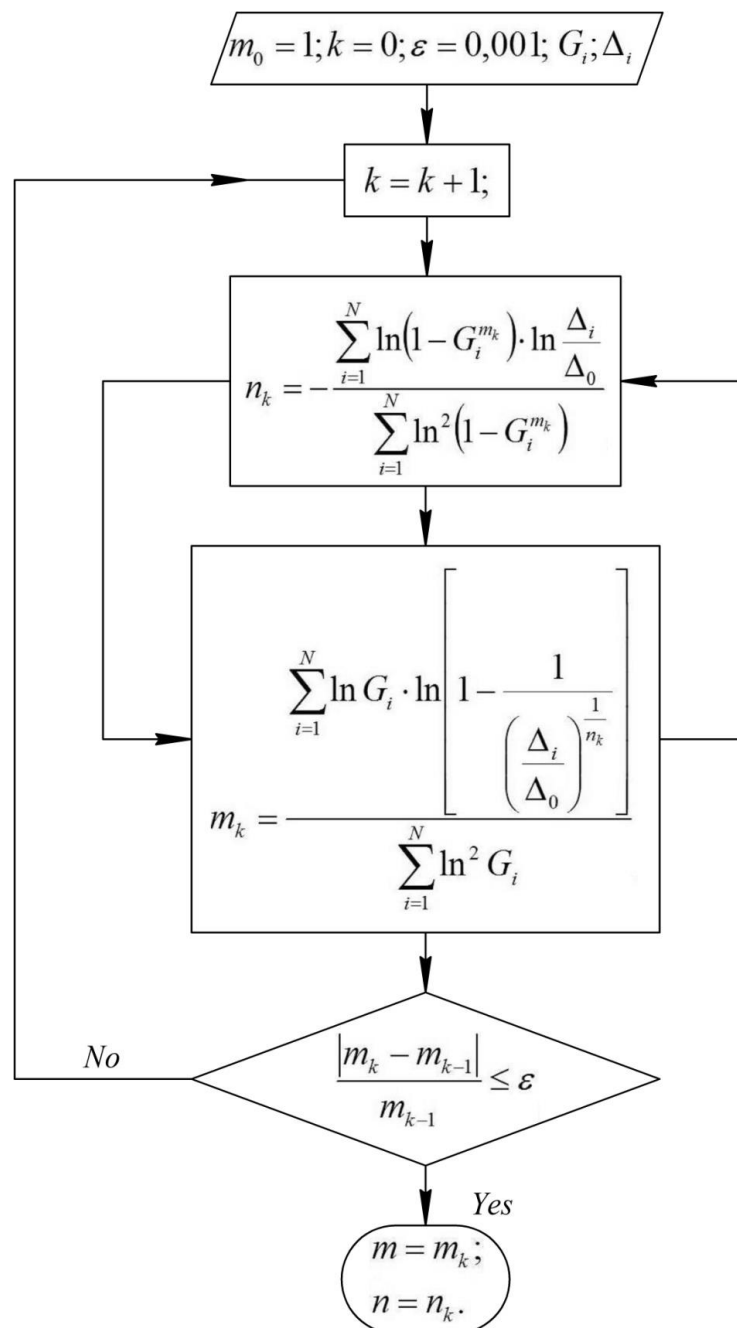


Рисунок 2.20 – Блок-схема ітераційної процедури по знаходженню коефіцієнтів m та n

1. Для значень $m \geq 1$ обирається $G_{min} = 0$, що відповідає спеціальному ВП, а G_{max} визначається з умови:

$$\Delta(G_{max}) = (1 + \delta)\Delta_0, \quad (2.13)$$

де δ – допустимий ступінь зниження точності ВП порівняно зі спеціальним.

З рівняння (2.13) із застосуванням виразу (2.2) знаходимо

$$G_{max} = \left[1 - \frac{1}{(1 + \delta)^{\frac{1}{n}}} \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (2.14)$$

2. Для значень $m < 1$ оптимальна гнучкість визначається мінімальним кутом α_{min} нахилу дотичної до графіка функції $\Delta(G)$ (рис. 2.28). Тангенс цього кута, виходячи із залежності (2.2):

$$tg\alpha = \frac{\partial\Delta}{\partial G} = \frac{m \cdot n \cdot \Delta_0 G^{m-1}}{(1 - G^m)^{n+1}} \rightarrow \min \quad (2.15)$$

Мінімальне значення кута α_{min} визначається з рівняння:

$$\frac{\partial(tg\alpha)}{\partial G} = \frac{\partial}{\partial G} \left[\frac{m \cdot n \cdot \Delta_0 G^{m-1}}{(1 - G^m)^{n+1}} \right] = 0. \quad (2.16)$$

З останнього рівняння шляхом тотожних математичних перетворень отримуємо

$$G_{opt} = \left[\frac{1 - m}{1 + m \cdot n} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (2.17)$$

а відповідне оптимальне значення точності з урахуванням формули (2.2):

$$\Delta_{opt} = \Delta(G_{opt}) = \Delta_0 \cdot \left[\frac{1 + m \cdot n}{m(n + 1)} \right]^n \quad (2.18)$$

Для отримання коефіцієнтів математичної моделі та перевірки її на адекватність при обробці двоплечих важелів у запропонованому ВП та аналогічних конструкціях спочатку необхідно визначитися з розмірами елементів ВП, а для цього необхідно виконати процедуру параметричної оптимізації запропонованої конструкції ВП.

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 багатокоординатної 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 [96, 97]:

- 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 [94] 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;

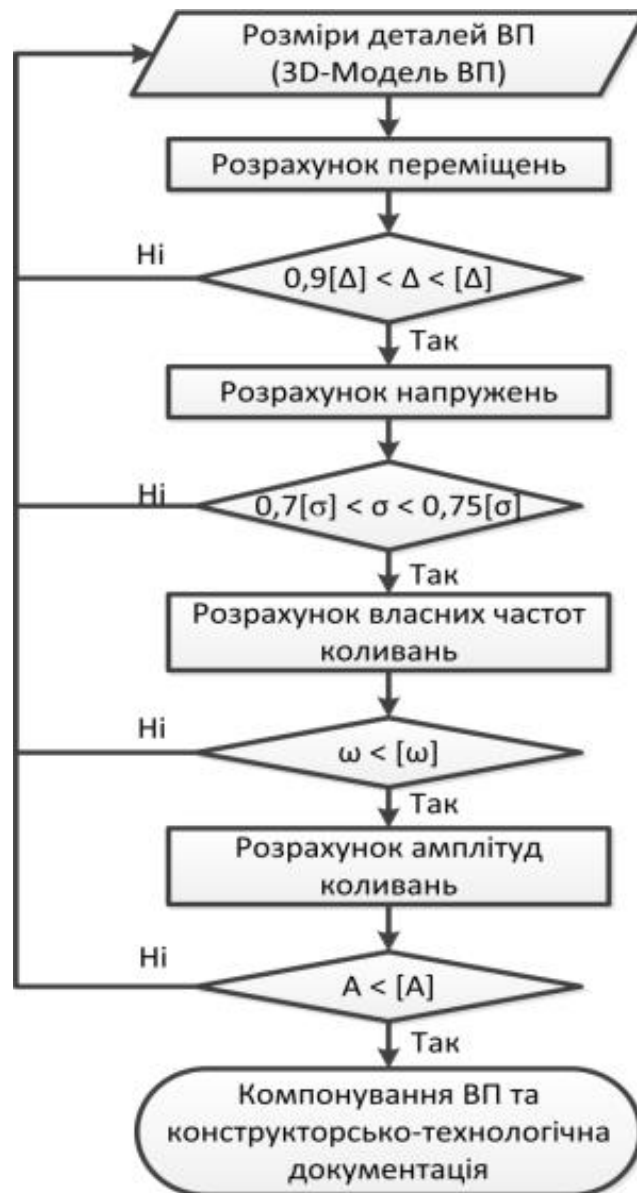


Рисунок 3.1 – Алгоритм параметричної оптимізації конструкції ВП

– 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 [94].

За вихідними даними – креслення деталі «Важіль» та характеристикою запропонованого ВП, що вказана у [94], 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.

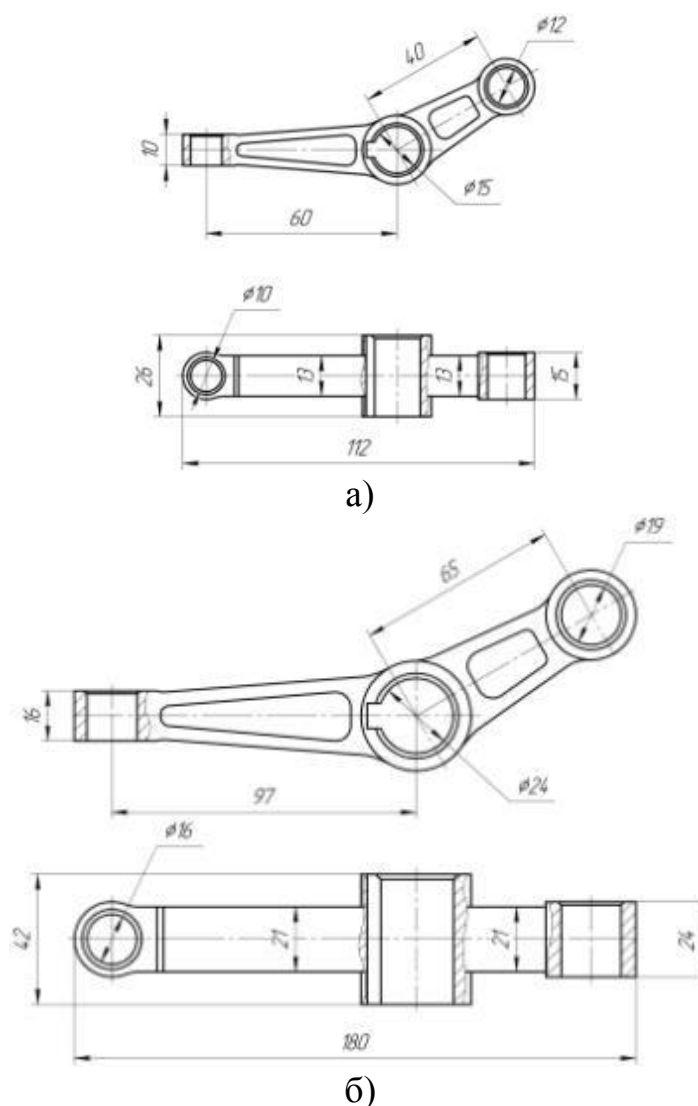


Рисунок 3.2 – Ескізи важелів з граничними розмірами у межах групи:
а – найменший типорозмір; б – найбільший типорозмір

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

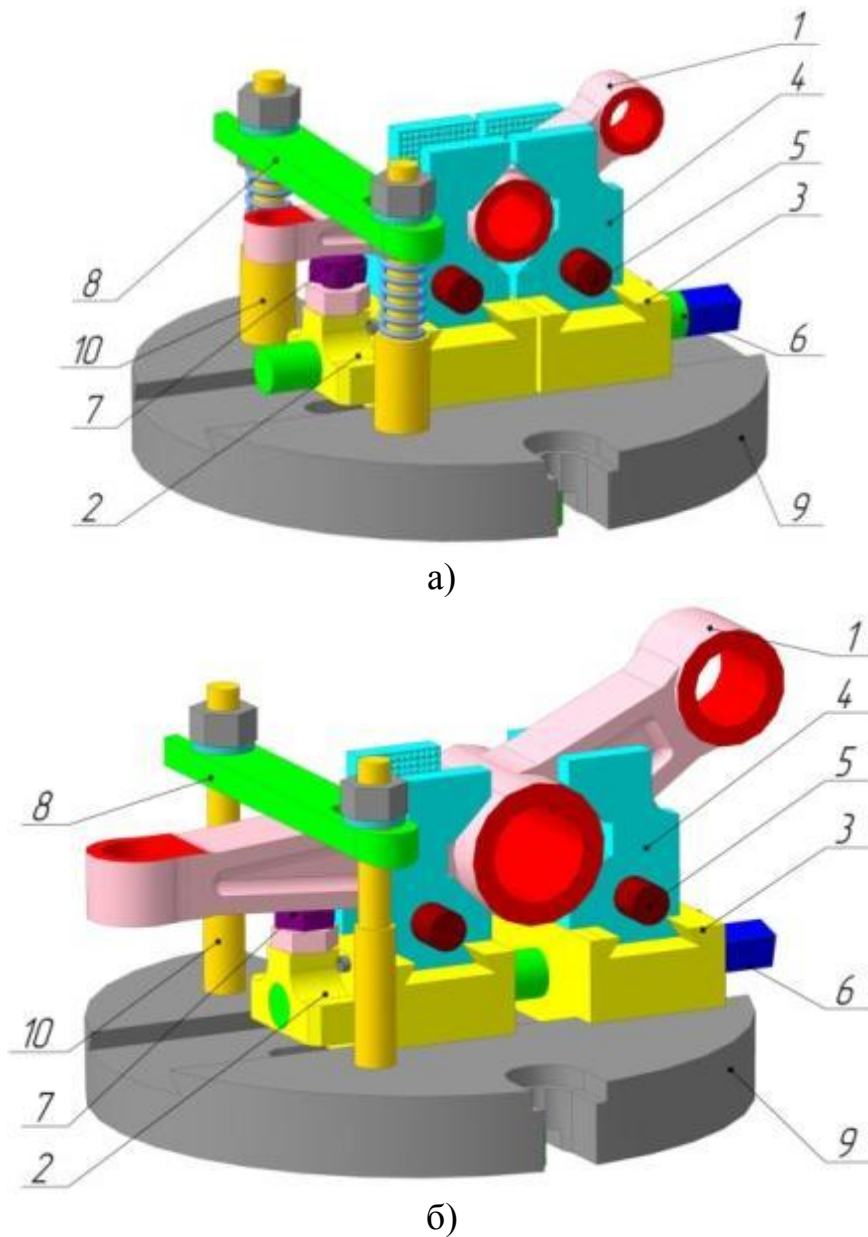


Рисунок 3.3 – Переналаджуваний установлювально-затискний модуль для обробки деталей типу важелів:

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 [98, 99]. 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.

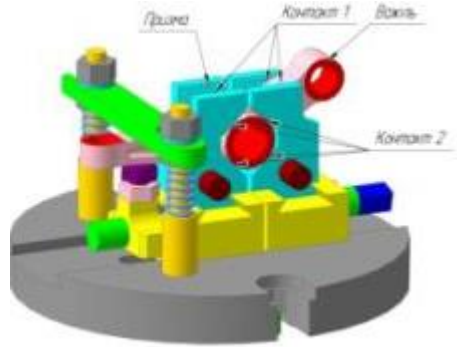
Таблиця 3.1 – Механічні властивості матеріалів заготовки та елементів ВП

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 [100] між елементами наведено в табл. 3.2.

За допомогою розрахункового комплексу ANSYS [101, 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 [103, 104], 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 [105]. 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 [105]. 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.

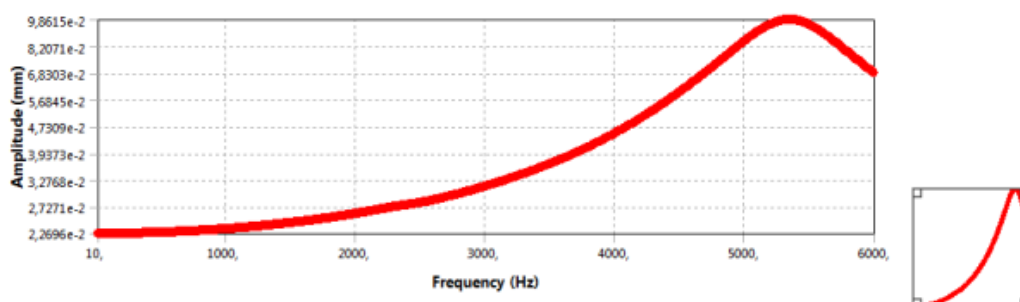
У результаті чисельного моделювання динаміки системи «ВП – заготовка» отримані значення амплітуд коливань і резонансних частот, зумовлених процесом різання. Визначені значення переміщень точок у зоні обробки для конструкцій ВП з мінімальними та максимальними розмірами для найбільш навантаженого переходу (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

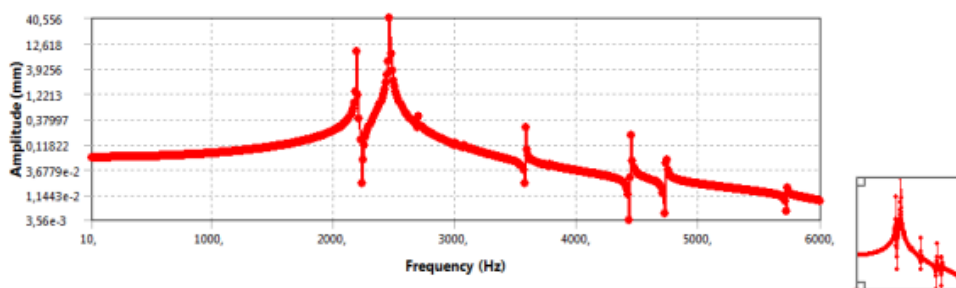
Конструкція ВП	Номінальна величина сили різання, Н	Амплітуда динамічної складової сили різання, Н	Максимальна амплітуда переміщення точки, мкм	Розрахунков а динамічна жорсткість, 10^7 Н/мм
З мінімальними розмірами	4964	993	24	0,42
З максимальними розмірами	7944	1589	65	0,25

Frequency Response



а)

Frequency Response



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 [107, 108] та результати порівнювались із запропонованим ВП для аналогічних переходів.

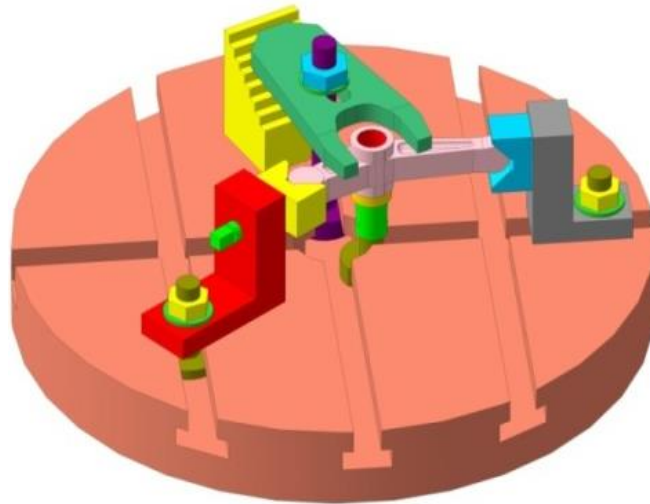


Рисунок 3.8 – ВП для операцій 05-15 типового ТП складений з елементів системи УЗП

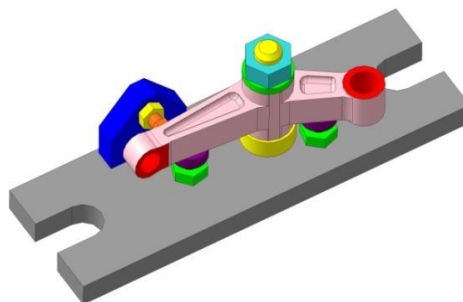


Рисунок 3.9 – ВП для операцій 20-30 типового ТП спеціальної конструкції

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 [111].

Таблиця 3.8 – Механічні властивості матеріалів заготовки та елементів ВП

Матеріал	Модуль пружності E , ГПа	Коефіцієнт Пуассона μ	Густина ρ , кг/м ³	Границя міцності при розтягуванні $\sigma_{раст}$, ГПа	Границя міцності при стисненні $\sigma_{сж}$, ГПа	Границя текучості σ_T , 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

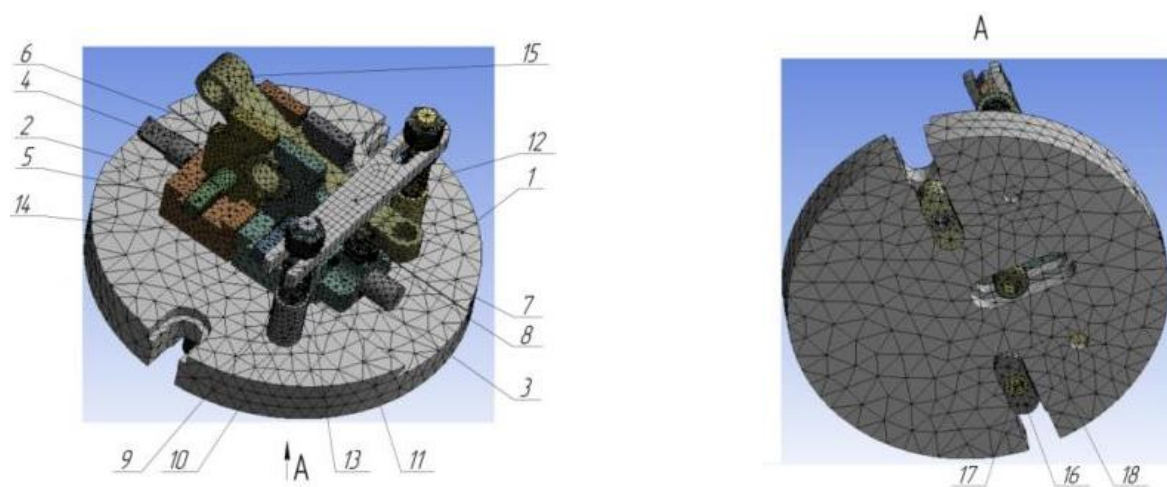


Рисунок 3.10 – Розрахункова 3D-модель запропонованого ВП для прогресивного ТП зі скінченноелементною сіткою

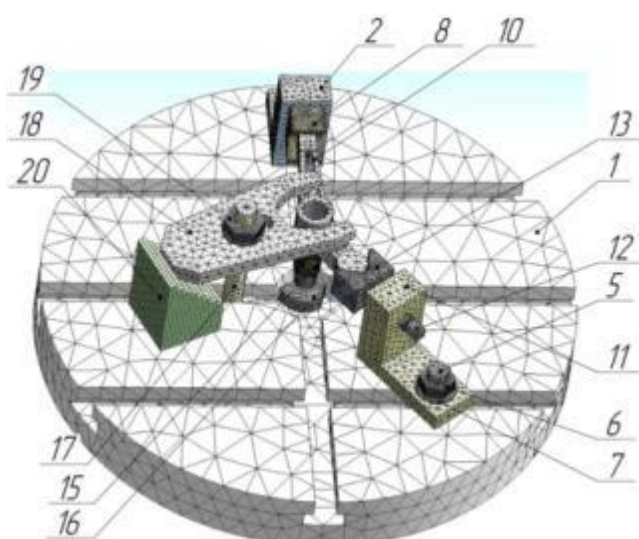


Рисунок 3.11 – Розрахункова 3D-модель ВП для типового ТП (операції 05-15) зі скінченноелементною сіткою

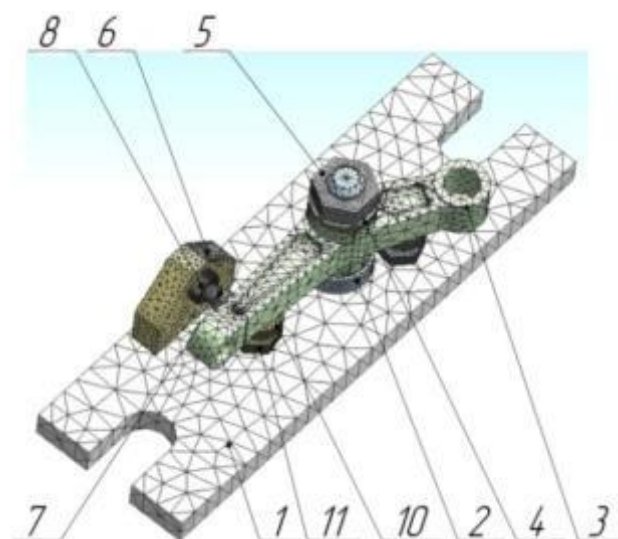


Рисунок 3.12 – Розрахункова 3D-модель ВП для типового ТП (операції 20-30) зі скінченноелементною сіткою

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)

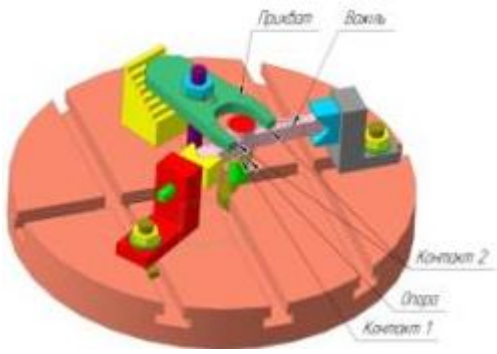
Назва деталі	Позиція (рис. 3.12)	Кількість деталей	Матеріал	Кількість вузлів	Кількість елементів
Плита	1	1	сталь	2135	1007
Оправка	2	1	сталь	1194	614
Важіль	3	1	сталь/СЧ 20/ АС 9	6139	3461
Шайба	4	1	сталь	221	23
Гайка	5	1	сталь	510	69
Опора	6	1	сталь	1053	538

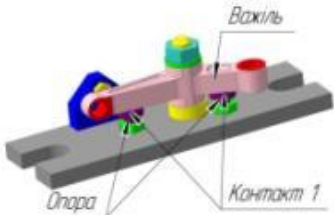
Продовження табл. 3.11

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 [101] 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 захоплювача – бокові поверхні важеля»: Поверхні захоплювача – гладкі; Поверхні заготовки – необроблені;</p>

	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 [103, 104], 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
Свердління головного	40ХН	0,02	0,019	72	101

отвору	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 [105]. 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 переналагоджуваний	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

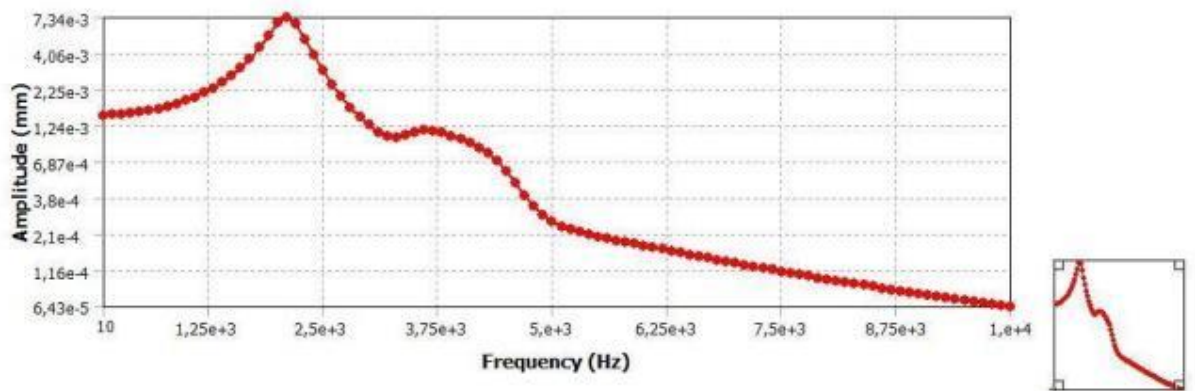
запропонованого ВП системи УЗПП у середньому на 0,01–0,02 мм. Це свідчить, що за інших рівних умов відхилення розмірів, форми і взаємного розташування поверхонь деталі, що обробляється у ВП системи УЗПП є меншими, що сприяє підвищенню точності обробки.

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 [111, 112].

Таблиця 3.15 – Результати гармонічного аналізу

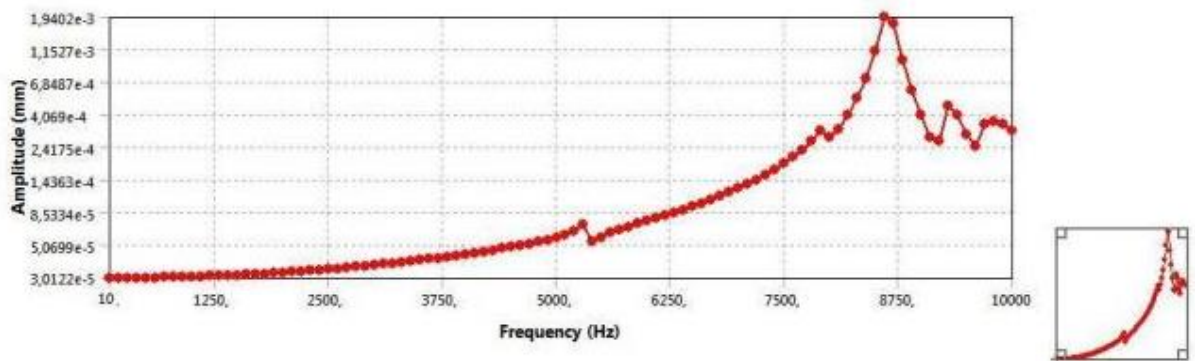
Технологічний перехід, де виникають найбільші навантаження	Матеріал важеля	Максимальна амплітуда, мкм	
		Типовий ТП	Запропонований ТП
Фрезерування торця бобишки головного отвору	40ХН	1,4	0,03
	СЧ20	1,1	0,024
	АС9	1,4	0,022
Свердління головного отвору	40ХН	24	1,7
	СЧ20	20	1,2
	АС9	21	1,2
Фрезерування 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)

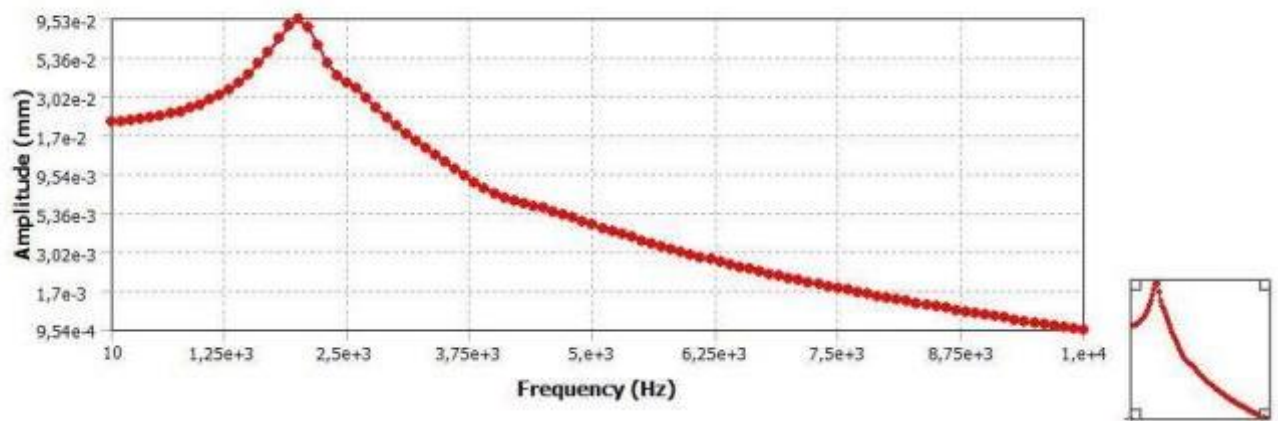
Рисунок 3.13 – АЧХ при фрезеруванні бобишки головного отвору для:

а – ВП, складеного з елементів комплексу УЗП;

б – ВП, складеного з елементів системи УЗПП

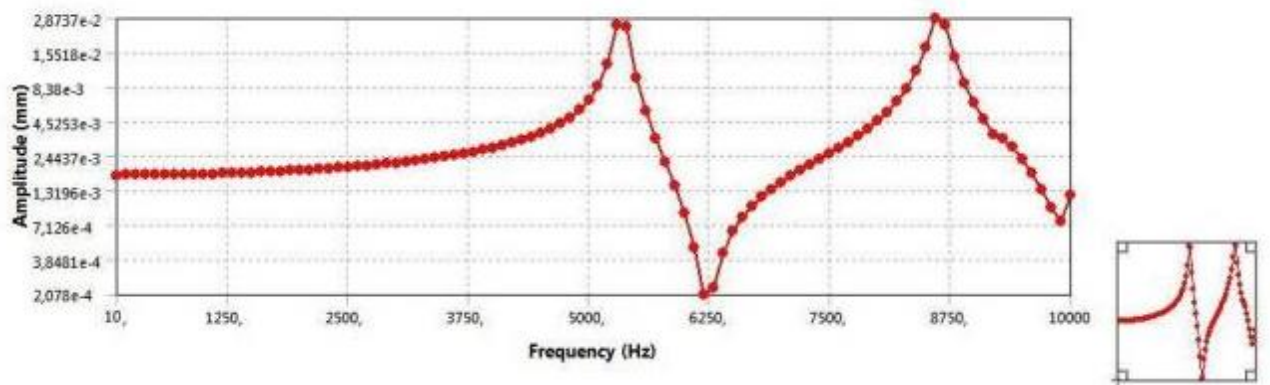
(матеріал важеля – сталь 40ХН)

Frequency Response



a)

Frequency Response



б)

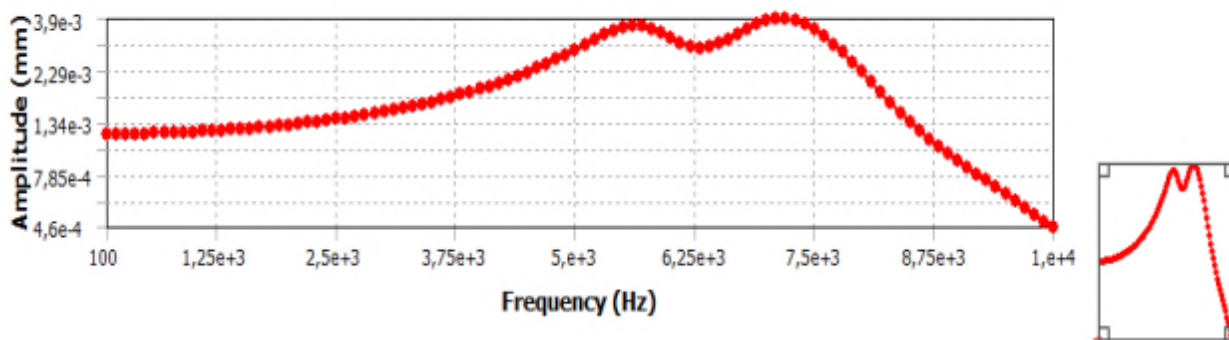
Рисунок 3.14 – АЧХ при свердлінні бобишки головного отвору для:

а – ВП, складеного з елементів комплекту УЗП;

б – ВП, складеного з елементів системи УЗПП

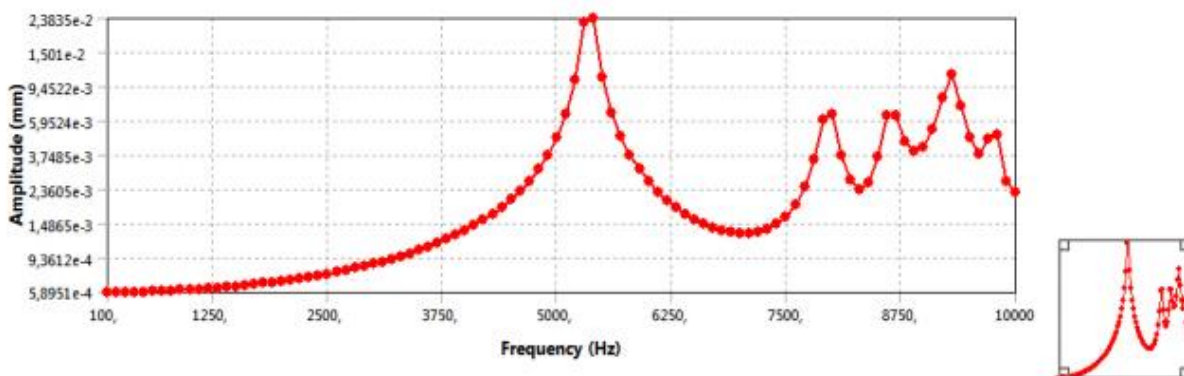
(матеріал важеля – сталь 40ХН)

Frequency Response



a)

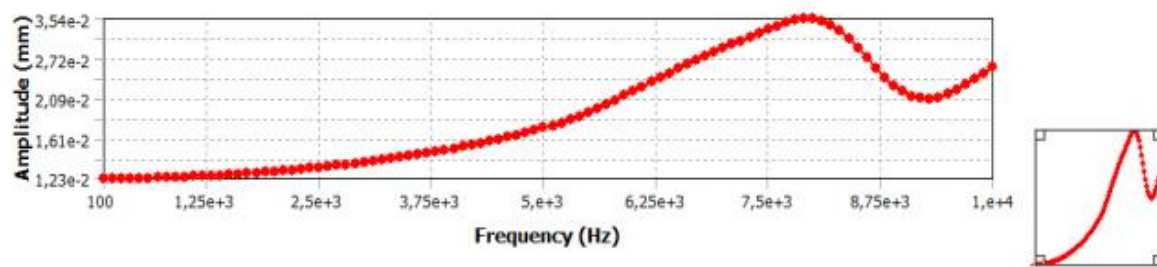
Frequency Response



б)

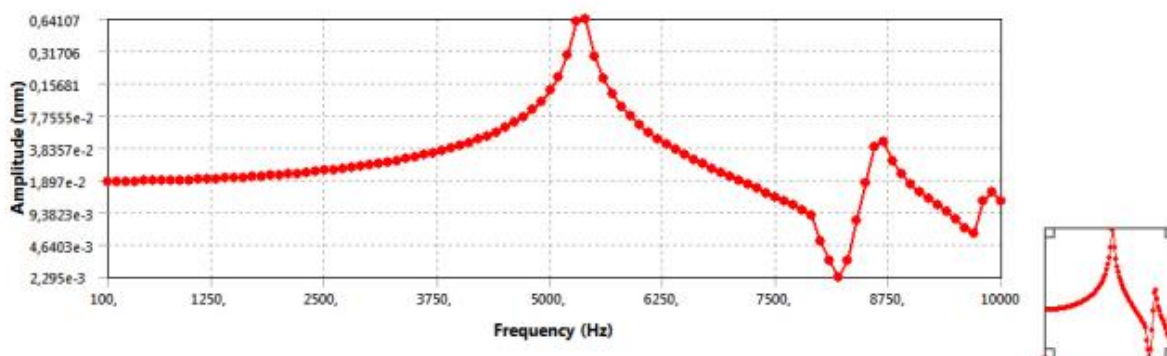
Рисунок 3.15 – АЧХ при фрезеруванні бобишки допоміжного отвору, що паралельний головному для: а – спеціального ВП; б – ВП, складеного з елементів системи УЗПП (матеріал важеля – сталь 40ХН)

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 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.

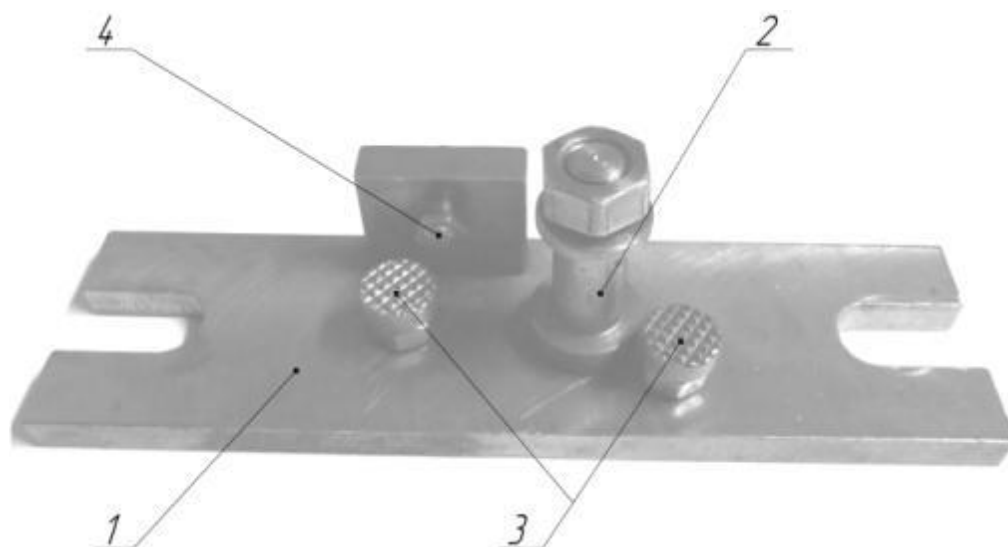


Рисунок 4.1 – Дослідний зразок спеціального ВП
для обробки деталей типу важелів

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.

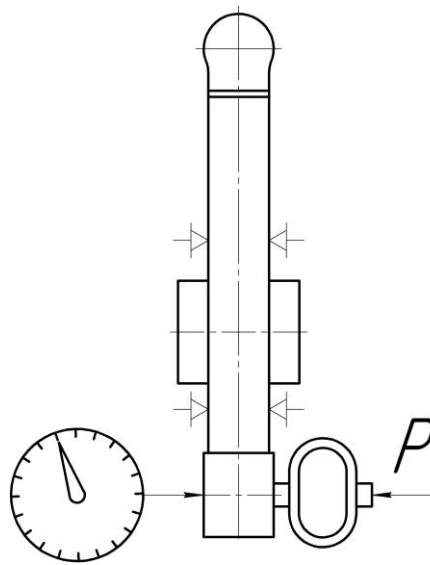
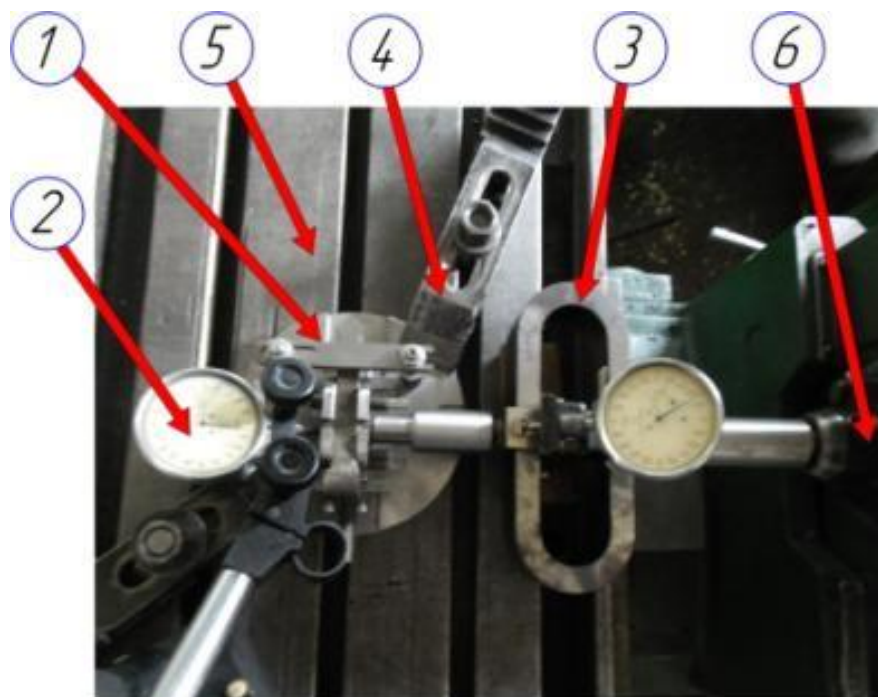


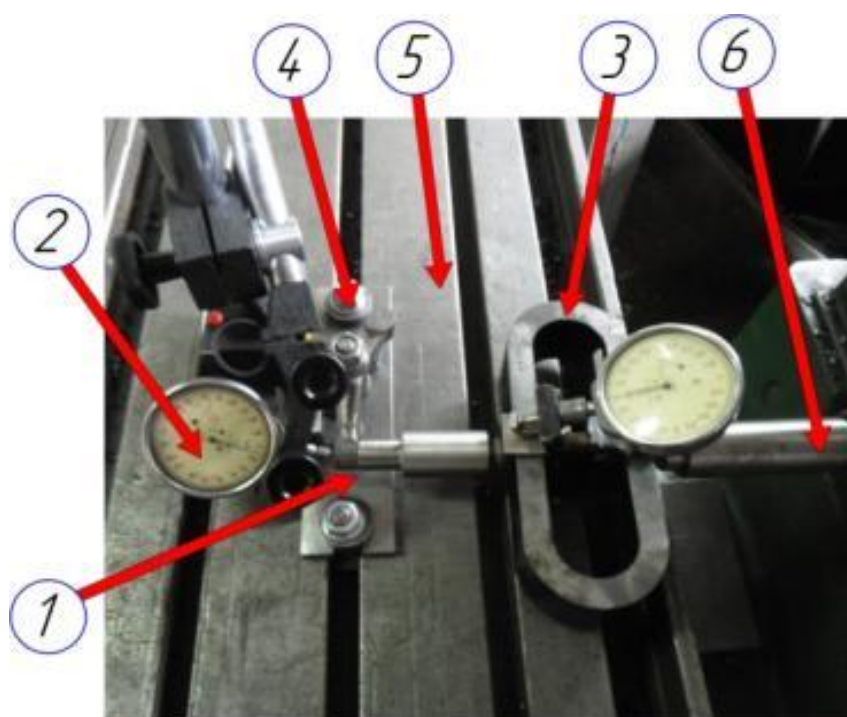
Рисунок 4.2 – Принципова схема дослідження напружено-деформованого стану

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 – Установа 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.

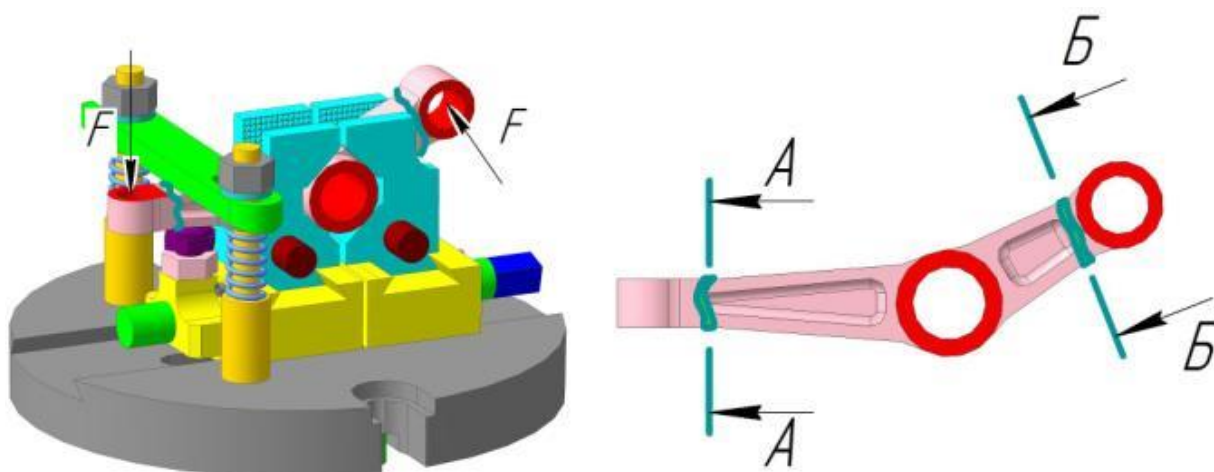


Рисунок 4.5 – Небезпечні перетини у конструкціях важелів при встановленні у ВП

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.

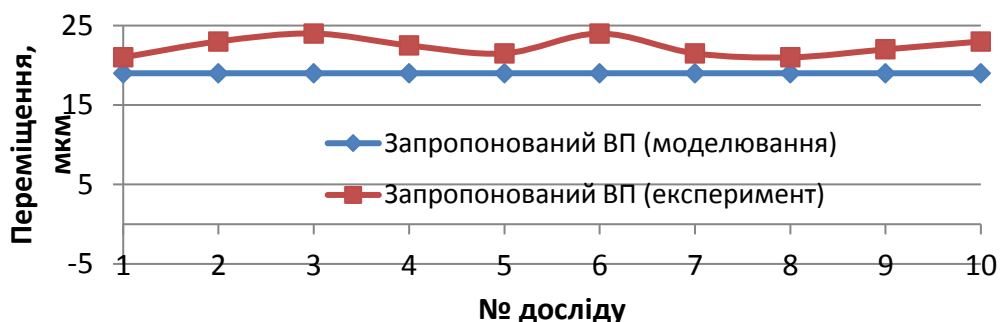


Рисунок 4.6 – Співставлення результатів моделювання та експериментальних даних при свердлінні головного отвору у запропонованому ВП ($P_0 = 5500$ Н, матеріал важеля сталь 40ХН)

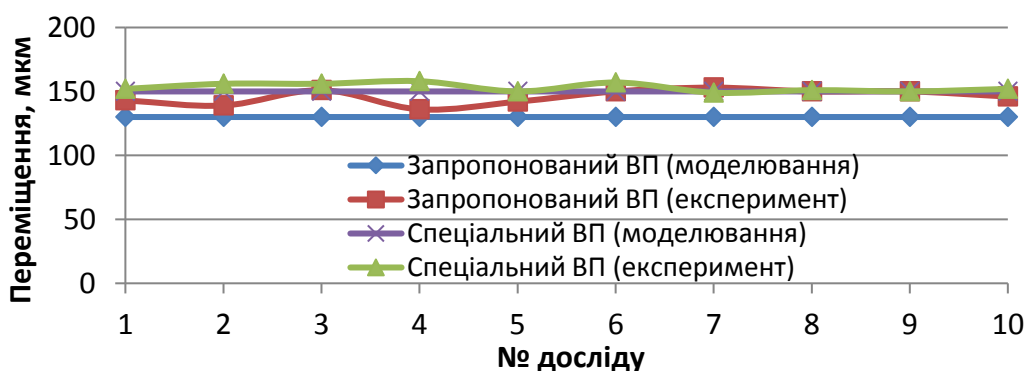


Рисунок 4.7 – Співставлення результатів моделювання та експериментальних даних при свердлінні бобишки допоміжного отвору, що паралельний головному у запропонованому та спеціальному ВП ($P_0 = 3300$ Н, матеріал важеля чавун СЧ20)

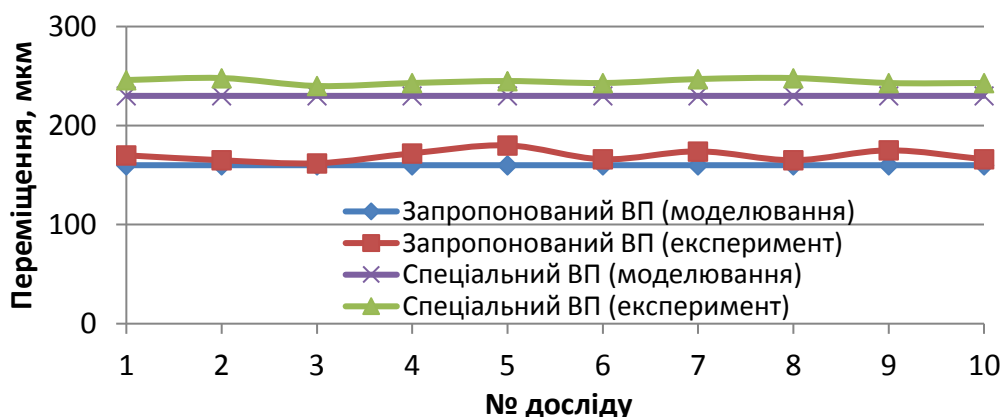


Рисунок 4.8 – Співставлення результатів моделювання та експериментальних даних при свердлінні бобишки допоміжного отвору, що перпендикулярний головному у запропонованому та спеціальному ВП ($P_0 = 2400$ Н, матеріал важеля чавун СЧ20)

Наявність розбіжності між результатами можна пояснити похибками вимірювання величини сили та переміщень, а також реальними властивостями матеріалу деталей ВП, що можуть відрізнятися 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).

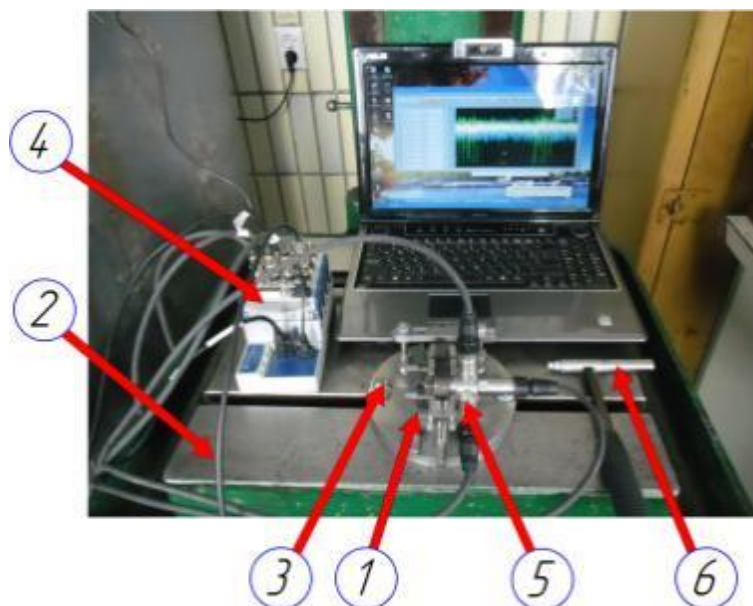


Рисунок 4.9 – Експериментальна установка для виконання модального аналізу для запропонованого ВП

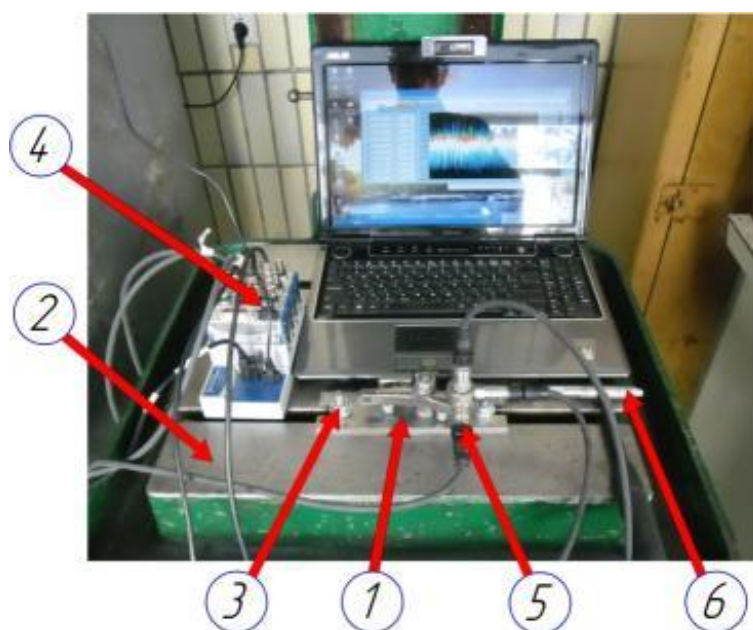


Рисунок 4.10 – Експериментальна установка для виконання модального аналізу для спеціального ВП

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.

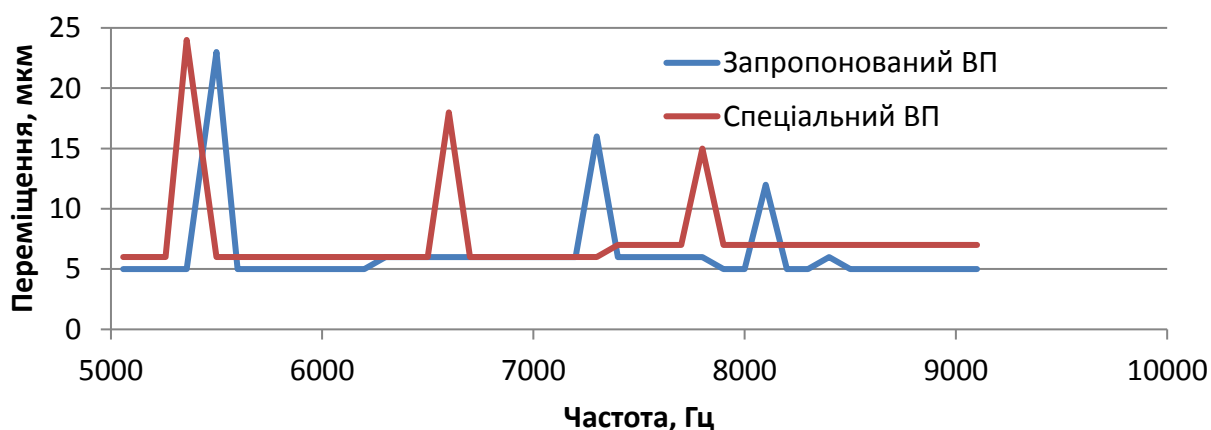


Рисунок 4.11 – Спектри власних частот коливань ВП

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 дисертаційній роботі досліджень та розроблення рекомендацій з впровадження запропонованого гнучкого ВП у виробництво виконано обробку важелів у запропонованому та спеціальному ВП.

Заготовками для виконання натурального 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 змашувально-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 запропонованого ВП на верстаті при обробці бобишки допоміжного отвору важеля, що перпендикулярний головному

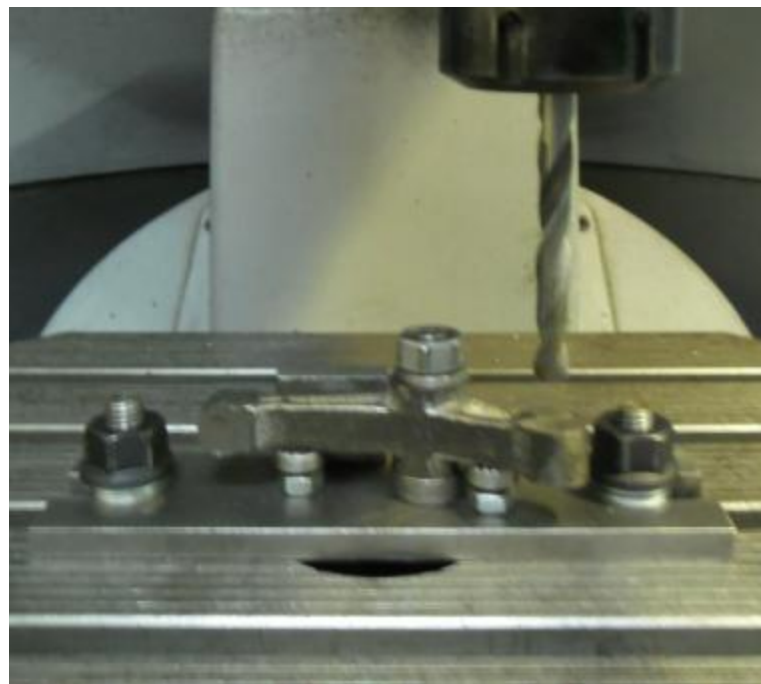


Рисунок 4.13 – Схема установки спеціального ВП на верстаті при обробці бобишки допоміжного отвору важеля, що паралельний головному

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».

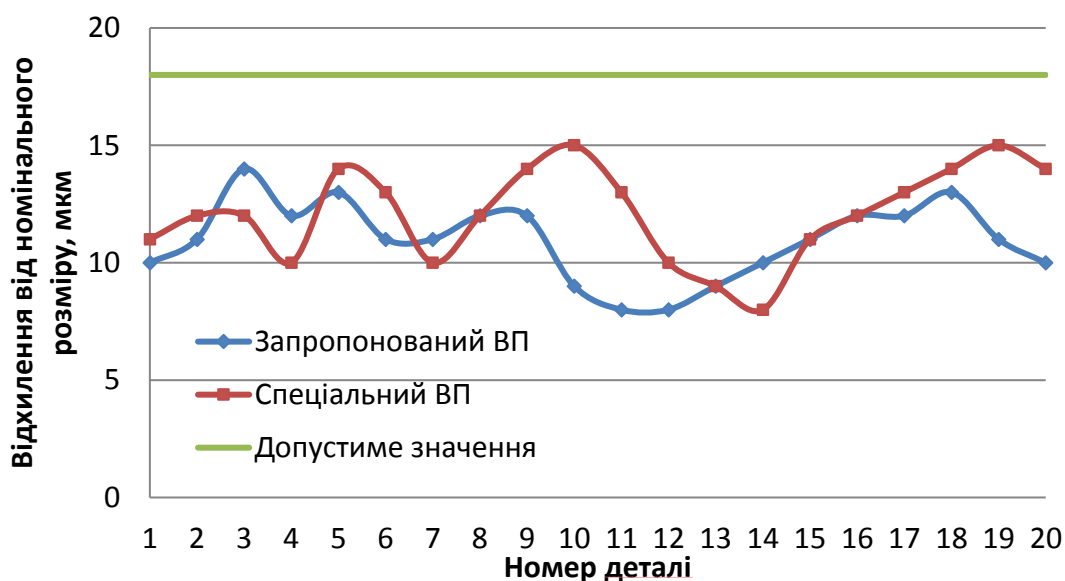


Рисунок 4.17 – Фактичні відхилення розміру головного отвору від номінального значення

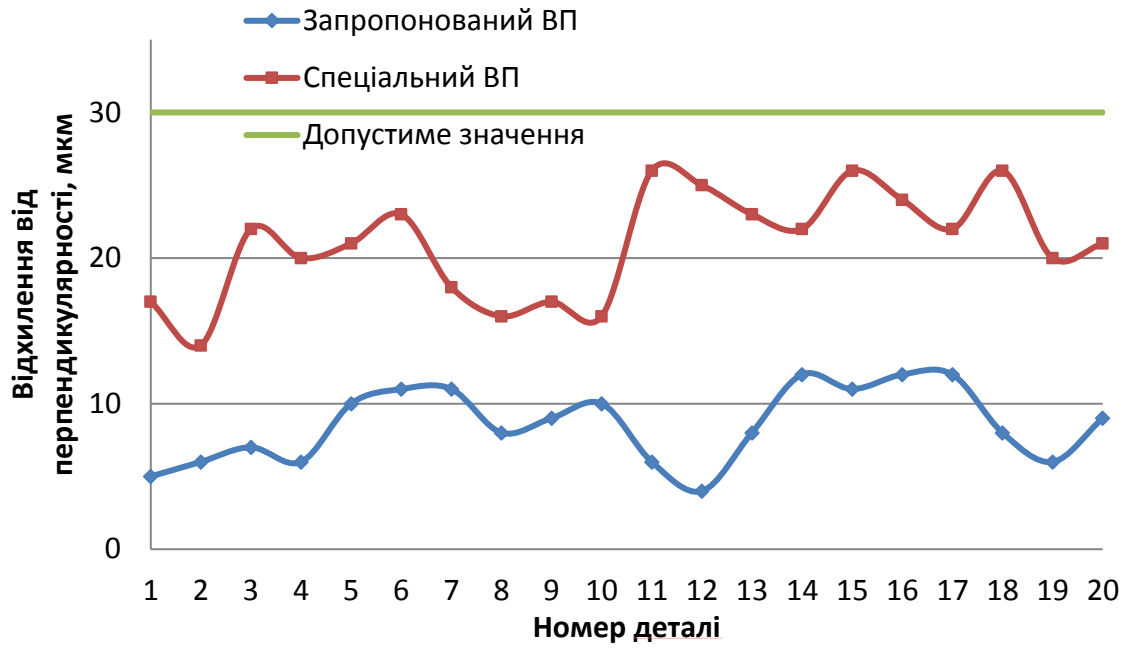


Рисунок 4.18 – Фактичні відхилення від перпендикулярності допоміжного отвору Ø10H9 відносно головного Ø15H7



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.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача підвищення ефективності обробки деталей типу важелів в умовах серійного виробництва шляхом систематизації об'єктів обробки за конструкторсько-технологічними ознаками й розроблення та впровадження гнучких ВП для багатокординатної обробки на верстатах із ЧПК.

1. Проаналізовано, систематизовано та розроблено класифікацію деталей типу важелів за конструкторсько-технологічними ознаками, а також запропоновано підхід до проектування ТП, що дозволяє скорочення витрат допоміжного та підготовчо-заключного часу від 133% до 1100% та засобів технологічного оснащення за рахунок реалізації багатокординатної обробки деталей за один установ.

2. Запропоновано методологічний підхід параметричної оптимізації гнучких ВП за критерієм зниження металомісткості, на основі якого розроблено конструкцію ВП з оптимальними параметрами елементів, що забезпечує установлення деталей у певному діапазоні розмірів при необхідній точності.

3. Отримано математичну залежність точності обробки двоплечих важелів на багатоцільових верстатах із ЧПК, що дозволяє визначити максимально можливу величину ступеня гнучкості ВП для досягнення заданої точності на конкретній операції/переході. Аналіз моделі підтвердив, що підвищення гнучкості ВП у межах допустимих моделлю, не призводить до виходу отримуваних розмірів за межі поля допуску.

4. Встановлено та експериментально підтверджено, що запропонований ВП зі ступенем гнучкості $G = 0,9$ забезпечує точність обробки на рівні зі спеціальними ВП. При цьому переміщення, які виникають на всіх переходах механічної обробки у ВП типового ТП, у середньому на 0,01–0,05 мм більші, а точність міжцентрових відстаней нижча на 0,02 мм, ніж у запропонованому ВП, що досягається завдяки обробці за один установ. Модальний аналіз показав, що

при обробці у запропонованому ВП резонансні частоти не виникають, а величини амплітуд коливань менші у середньому на 0,01–0,02 мм порівняно з ВП типового ТП.

5. Результати досліджень впроваджено у виробництво виробів колісних навантажувачів на ПАТ “Роменський завод “Тракторозапчастина” (м. Ромни). Виробничі випробування підтвердили ефективність запропонованих технічних рішень швидкопереналагоджуваних ВП, а саме: точність обробки заготовок при застосуванні гнучких ВП відповідає заданій точності; підготовчо-заключний час, пов’язаний з переналагодженням, скоротився у середньому в 5 разів, а допоміжний час на установлення – у 12 разів порівняно із застосуванням спеціальних ВП при скороченні їх кількості з 5 до 1.

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. Іванов В. О. Конструкторсько-технологічний аналіз сучасних свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів / В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, І. М. Дегтярьов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 95–105.

9. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : навч. посіб. для ВНЗ. Ч. 1. Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання / В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнецов, 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. Кузнецов, 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. Кузнецов, 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. Боровик А. І. Спрощена методика розрахунку верстатних пристроїв на точність / А. І. Боровик. // *Вісник ЧДТУ*. – 2013. – №2. – С. 121–127.

23. Мельничук П. П. Технологія машинобудування / П. П. Мельничук, А. І. Боровик, П. А. Лінчевський, Ю. В. Петраков. – Житомир : Житомирський державний технічний університет, 2005. – 882 с.

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. Классификатор ЕСКД 1.79.100 ОК 012-93. Класс 74. Иллюстрированный определитель деталей – Москва. – 43 с. – (Издательство стандартов).
74. Брон А. М. Обработка корпусных деталей на многоцелевых станках с ЧПУ: учеб. пособие / А. М. Брон. – Москва : Машиностроение, 1986. – 41 с.
75. Иванов В. А. Конструктивные особенности деталей сложной формы в структуре автомобиля / В. А. Иванов, И. М. Дегтярев // *Прогрессивные технологии и процессы: сборник научных статей Междунар. молод. научно-техн. конф., 25–26 сентября 2014 г., Курск*. – Курск : ЮЗГУ, 2014. – Т. 1. – С. 238–243.
76. Карпусь В. Є. Ефективне використання верстатів з ЧПК у авіаційному агрегатобудуванні / В. Є. Карпусь, В. О. Границя. – Харків: ДП ХМЗ «ФЕД», 2009. – 228 с.

77. Пермяков А. А. К вопросу об унификации установочно-зажимных приспособлений агрегатированного оборудования / А. А. Пермяков, И. Э. Яковенко // Вісник НТУ "ХПІ" : – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – № 33 (1205). – С. 38–42.
78. Черпаков Б. И. Технологическая оснастка / Б. И. Черпаков. – М: Академия, 2003. – 288 с.
79. Григорьев С. Н. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: Справочник / С. Н. Григорьев, М. В. Кохомский, А. Р. Маслов. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
80. Карпусь В. Е. Конструктивно-технологическое обеспечение эффективной эксплуатации станков с ЧПУ / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов, А. В. Котляр // Авиационно-космическая техника и технология. – Харків : НАУ ім. Н. Е. Жуковського "ХАІ", 2008. – № 7 (54). – С. 32–35.
81. Кузнецов Ю.И. Станочные приспособления для групповой обработки : обзор. – М.: НИИмаш, 1980, 29 с.
82. Карпусь В. Е. Современные требования к технологической оснастке станков с ЧПУ / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2008. – № 22. – С. 23–35.
83. Котов А. С. Переналаживаемая технологическая оснастка для механосборочного производства / А. С. Котов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2008. – № 2. – С. 31–37.
84. Косенко В. В. Переналаживаемая технологическая оснастка изготовления деталей спецтехники на многооперационных станках и гибких производственных системах / В. В. Косенко, А. С. Кобзев // Системи обробки інформації. – 2014. – № 6. – С. 43–45.
85. Boyle I. A Review and Analysis of Current Computer-Aided Fixture Design Approaches. / I. Boyle, Y. Rong, D. Brown // International Journal of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2011. – № 27 – P. 1–12.
86. ГОСТ 31.0151.01-90 Приспособления универсальные наладочные и специализированные наладочные. Общие технические условия.

87. Карпусь В. Е. Универсально-сборные переналаживаемые приспособления / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Вестник машиностроения. – 2008. – № 11. – С. 46–50.

88. Karpus V. E., Ivanov V. A. Universal- Composite Adjustable Machine - Tool Attachments. Russian Engineering Research, 2008, Vol. 28, Issue 11, pp. 1077–1083, doi: 10.3103/S1068798X08110105.

89. Карпусь В. Е. Обоснование выбора системы приспособлений в серийном производстве / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Високі технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2008. – Вип. 1 (16). – С. 125–134.

90. Карпусь В. Е. Вдосконалення системи збірних верстатних пристроїв / В. Є. Карпусь, В. О. Иванов // Наукові нотатки : міжвузівський зб. (за напрямом “Інженерна механіка”). – Луцьк : ЛНТУ, 2009. – Вип. 24. – С. 256–264.

91. Иванов В. О. Резерви підвищення гнучкості верстатних пристроїв механообробного виробництва / В. О. Иванов, В. Є. Карпусь, І. М. Дегтярьов // Житомир : Вісник Житомирського державного технологічного університету, 2015. – № 4 (75). – С. 38–44.

92. Иванов В. О. Технологія виготовлення автомобільних деталей складної форми / В. О. Иванов, В. Є. Карпусь, І. М. Дегтярьов, В. Р. Богдан // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – Харків. : Національна академія Національної гвардії України, 2015. – №. 1 (25). – С. 85–90.

93. Технология машиностроения (специальная часть) : учеб. для машиностр. спец. ВУЗов / А. А. Гусев, Е. Р. Ковальчук, И. М. Колесов и др. – Москва : Машиностроение, 1986. – 480 с.

94. Пат. 98925 U Україна, МПК (2015.01) В23В 39/00. Переналагоджуваний установлювально-затискний модуль для обробки деталей типу важелів / В.О. Иванов, І.М. Дегтярьов, В.Є. Карпусь, (Україна); заявник та патентовласник

Сумський державний університет. – № u201413066; заявл. 05.12.2014; опубл. 12.05.2015, бюл. № 9.

95. Косов Н. П. Станочные приспособления для деталей сложной формы : книга / Н. П. Косов. – М : Машиностроение, 1973. – 234 с.
96. Батищев Д. И. Методы оптимального проектирования / Д. И. Батищев. – М : Радио и связь, 1984. – 248 с.
97. Батищев Д. И. Поискные методы оптимального проектирования / Д. И. Батищев. – М : Сов. Радио, 1988. – 112 с.
98. 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.
99. Пасічник В. А. Синтез інструментального забезпечення для оброблення отворів на основі декомпозиції виробу на оброблювані поверхні // В. А. Пасічник В. М. Юхимчук // Вісник НТУУ «КПІ», Машинобудування № 74. – 2015. – С. 18–23.
100. Яковенко И. Э. Оптимизация режимов резания при обработке инструментальными блоками / И. Э. Яковенко, А. А. Пермяков // Вісник НТУ "ХПІ" : – Харків : НТУ "ХПІ". – 2015. – № 4 (1113). – С. 89–92.
101. Косилова А. Г. Справочник технолога-машиностроителя : справочник : в 2 т. / А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков. – Москва.: Машиностроение, 1985. – Т. 2 – 656 с.
102. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз. – Москва. : Мир, 1981. – 304 с.
103. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике / О. К. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 420 с.
104. Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – 576 с.
105. Іванов В. О. Чисельне моделювання верстатних пристроїв для механічної обробки деталей типу важелів / В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, І. М. Дегтярьов та ін. // Вісник НТУ «ХПІ» : – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 4 (1113). – С. 110–115.

106. 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 ІV Всеукраїнської міжвуз. науково-техн. конф., 19–22 квітня 2016 р., Суми : у 2-х ч. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – Ч.1. – С. 29.

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

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

109. Ivanov V. Mathematical model of the fixture flexibility impact on machining accuracy of levers / V. Ivanov, I. Dehtiarov, I. Pavlenko // Acta Mechanica Slovaca. – Kosice: Technical University of Kosice, 2016. – Vol. 20 No. 2. – P. 6–15.

110. Математична залежність точності верстатних пристроїв від їх ступеня гнучкості / В.О. Іванов, І.М. Дегтярьов, І.В. Павленко та ін. // Системи розроблення та поставлення продукції на виробництво : матеріали І Міжнар. науково-практ. конф., 17-20 травня 2016 р., Суми. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – С. 266.

111. Иванов В. А. Исследование напряженно-деформированного состояния станочных приспособлений для обработки деталей типа рычагов / В. А. Иванов, И. М. Дегтярев, В. Р. Богдан // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сборник научных трудов XII Междунар. научно-техн. конф., 19–20 марта 2015 г., Курск : в 4 т. – Курск : ЮЗГУ, 2015. – Т. 2. – С. 162–166.

112. Іванов В. О. Аналіз динамічного стану системи «верстатний пристрій – заготовка» / В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, І. М. Дегтярьов, І. В. Павленко, Й. Ронг // Журнал інженерних наук. – Суми: Сумський державний університет, 2016. – №1 (3). – С. 1–8.

113. Ivanov V. Numerical simulation of the system “fixture–workpiece” for lever machining / V. Ivanov, D. Mital, V. Karpus, I. Dehtiarov et. al. // The

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 12 p., doi: 10.1007/s00170-016-9701-2.

114. Іванов В. О. Аналіз експериментальних даних та їх співставлення з результатами моделювання / В. О. Іванов, І. М. Дегтярьов // *Машинобудування очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво : матеріали XVI міжнар. молод. науково-техн. конф., 26–29 жовтня 2016 р., Суми. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – С. 22.*

115. CARR LANE Manufacturing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.carrlane.com/en-us/> (04.03.2017).

116. Пат. на корисну модель 71870 U Україна, МПК12 В23В 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль / В. О. Іванов, І. М. Дегтярьов, П. В. Кушніров (Україна); заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u2012 01450 - заявл. 13.02.2012; опубл. 25.07.2012, бюл. № 14.

117. Пат. на корисну модель 96399 U Україна, МПК (2015.01) В23В 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль / В. О. Іванов, І. М. Дегтярьов (Україна); заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u201407015; заявл. 23.06.2014; опубл. 10.02.2015, бюл. № 3.

118. Пат. на корисну модель 95074 U Україна, МПК (2014.01) В23В 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль / В. О. Іванов, І. М. Дегтярьов (Україна); заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u201407017; заявл. 23.06.2014; опубл. 10.12.2014, бюл. № 23.

119. Пат. на корисну модель 105296 U Україна, МПК (2016.01) В23В 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль / В. О. Іванов, І. М. Дегтярьов (Україна); заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u201509353; заявл. 28.09.2015; опубл. 10.03.2016, бюл. № 5.

120. Пат. на корисну модель №109622 Україна, МПК (2016.01) В23В 39/00. Переналагоджуваний установлювально-затискний модуль / В. О. Іванов, І. М. Дегтярьов, В. Є. Карпусь, В. С. Курочкіна; заявник та власник патенту Сумський державний університет. – № u2016 02829; заявл. 21.03.2016; опубл. 25.08.2016, бюл. № 16.