

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

Кафедра інжинірингу машинобудівних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня
магістр

на тему: Розроблення технології виготовлення стійки ЖВМ 22.122.19
з дослідженням програмних продуктів для генеративного дизайну

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МПм-62
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
(шифр і назва спеціальності)

	<hr/>	Рискальчик С.І. (прізвище та ініціали)
	(підпис)	
Керівник	<hr/>	Васильків В.В.. (прізвище та ініціали)
	(підпис)	
Нормоконтроль	<hr/>	Дячун А.Є. (прізвище та ініціали)
	(підпис)	
Завідувач кафедри	<hr/>	Окіпний І.Б. (прізвище та ініціали)
	(підпис)	
Рецензент	<hr/>	Ярема І.Т. (прізвище та ініціали)
	(підпис)	

Тернопіль
2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Інженерії машин, споруд і технологій
(повна назва факультету)

Кафедра інжинірингу машинобудівних технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Окіпний І.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістра
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 131 "Прикладна механіка"
(шифр і назва спеціальності)

студенту Рискальчику Сергію Івановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення технології виготовлення стійки ЖВМ 22.122.19
з дослідженням програмних продуктів для генеративного дизайну

Керівник роботи Васильків Василь Васильович, доктор технічних наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 16 » 11 2023 року № 4/7 -1057

2. Термін подання студентом завершеної роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Креслення деталі, інформація про технологічні можливості машинобудівного підприємства (перелік устаткування тощо), дрібносерійний тип виробництва

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Розробити ТП виготовлення деталі та спроектувати необхідне спорядження.

2. Виконати наукові дослідження динаміки патентних потоків щодо вдосконалення технологій генеративного дизайну, розробити методика щодо використання методу аналізу ієрархій для вибору програмних продуктів для реалізації технологій генеративного дизайну виробів у машинобудуванні

3. Структурувати основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори та відповідні заходи щодо зменшення їх шкідливого впливу та норми техніки безпеки а також визначити основні протипожежні заходи для реалізації безпечної роботи на підприємстві при реалізації технології виготовленні деталі.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Креслення деталі з 3D моделлю – 1 лист А2, 2. Креслення заготовки, 3Д модель заготовки – 1 лист А2; 3. Верстатний пристрій – 1 лист А1, 1. Технологічні налашки – 1 лист А1,

5. План розміщення технологічного устаткування – 1 лист А1. Графічна ілюстрація результатів досліджень програмних продуктів для генеративного дизайну(2А1)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	Ткаченко І. Г., доц. каф. МТ		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>			

7. Дата видачі завдання 18.11.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	<i>Аналітична частина</i>	28.11.2023	
	<i>Науково-дослідна частина</i>	04.12.2023	
	<i>Технологічно-конструкторська частина</i>	09.12.2023	
	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	16.12.2023	
	<i>Виконання графічної частини</i>	14.12.2023	
	<i>Опублікування матеріалів результатів досліджень</i>	12.12.2023	
	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	20.12.2023	
	<i>Подання роботи до кафедри та попередній захист</i>		
	<i>Захист магістерської роботи</i>	29.12.2023	

Студент

(підпис)

Рискальчик С.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Васильків В.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Об'єкт досліджень – технологічний процес виготовлення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» та план механічної дільниці для його реалізації.

Метою розробки є розроблення раціонального технологічного процесу виготовлення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» та дослідження програмних продуктів для генеративного дизайну.

У першому розділі проведено аналіз службового призначення та технологічності деталі та систематизовані завдання на дипломне проектування.

У другому розділі проведено аналіз динаміки патентних потоків щодо вдосконалення технологій генеративного дизайну, виконано моніторинг використання програмних продуктів для такого дизайну та показано особливості використання методу аналізу ієрархій для вибору програмних продуктів для реалізації проектних рішень на основі такої технології дизайну виробів у машинобудуванні.

У третьому розділі наведено розрахунки технологічного процесу виготовлення деталі. В рамках цього виконано вибір та економічне обґрунтування оптимального способу отримання заготовки, методів обробки, технологічних та вимірювальних баз, технологічного устаткування, сформовано технологічний маршрут виготовлення деталі, розраховано припуски на обробку та розміри заготовки, здійснено розмірний аналіз технологічного процесу, вибір технологічних пристроїв і ріжучих та вимірювальних інструментів, спроектовано маршрутний та операційний технологічний процес виготовлення деталі, розраховано режими різання, проведено технічне нормування технологічного процесу, спроектовані технологічні наладки. Також розроблено комплект технологічної документації.

У третьому розділі наведені розрахунки параметрів затискного пристрою для закріплення деталі на операції фрезерування. Також обґрунтовано структуру механоскладальної дільниці та виконано економічний аналіз показників запропонованого технологічного процесу виготовлення деталі.

У четвертому розділі описані заходи, щодо створення оптимальних метеорологічних умов на робочих місцях, наведено розрахунок загальнообмінної вентиляції, окреслені порядок проведення робіт на машинобудівному підприємстві в умовах надзвичайних ситуаціях воєнного часу.

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи містить: 92 с., 38 рис., 3 табл., 3 додатки на 19 стор., 29 джерел переліку посилань, 6 листів графічної частини.

Об'єкт дослідження: ТП виготовлення деталі та пограмні продукти для генеративного дизайну.

Виконання роботи здійснено на основі використання сучасних інформаційно-комунікаційних систем, математичних методів та обчислювальних засобів.

Метою розробки є розроблення раціонального ТП виготовлення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» та розробка методики вибору та обґрунтування доцільності використання програмних продуктів для генеративного дизайну.

Практичне значення отриманих результатів: розроблений ТП виготовлення деталі “Стійка”, вироблені рекомендації щодо вибору програмних продуктів для генеративного дизайну.

Результати наукових досліджень опубліковані в тезах Міжнародної науково-технічної конференції “Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні” (6-7 грудня 2023 р., Національний університет «Одеська політехніка»).

Ключові слова: генеративний дизайн, технологічний процес виготовлення деталі, механічне оброблення.

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз службового призначення та технологічності деталі

1.2 Поняття про генеративний дизайн та задачі досліджень

1.3 Висновки до розділу

2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1 Аналіз динаміки патентних потоків щодо вдосконалення технологій генеративного дизайну

2.2 Моніторинг використання програмних продуктів для генеративного дизайну

2.3 Використання методу аналізу ієрархій для вибору програмних продуктів для реалізації технологій генеративного дизайну виробів у машинобудуванні

2.4 Висновки до розділу

3 ТЕХНОЛОГІЧНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Вибір та економічне обґрунтування способу отримання заготовки

3.2 Вибір методів обробки заготовки деталі “Стійка”

3.3 Вибір технологічних та вимірювальних баз

3.4 Технологічний маршрут виготовлення деталі “Стійка”

3.5 Вибір технологічного устаткування

3.6 Розрахунок припусків на обробку та розмірів початкової заготовки

3.7 Розмірний аналіз технологічного процесу

3.8 Вибір технологічного спорядження

3.9 Вибір ріжучих та вимірювальних інструментів

3.10 Маршрутний та операційний ТП виготовлення стійки

3.11 Розрахунок режимів різання

3.12 Технічне нормування ТП

3.13 Розроблення технологічних наладок

3.14 Розрахунок пристрою для закріплення заготовки деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» на фрезерному верстаті

3.15. Розрахунок точності пристрою для закріплення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19»

3.16 Розрахунок кількості устаткування та показників його використання для дільниці цеху

3.17 Розрахунок технологічної собівартості виготовлення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19»

3.18 Висновки до розділу

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Заходи, щодо створення оптимальних метеорологічних умов на робочих місцях

4.2 Розрахунок загальнообмінної вентиляції

4.3 Проведення робіт на машинобудівному підприємстві в умовах надзвичайних ситуаціях воєнного часу

4.4 Висновки до розділу

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

ДОДАТКИ

ВСТУП

У сучасному світі, в якому технології стрімко розвиваються, галузі, які традиційно вважалися консервативними, відчують необхідність в інноваціях та впровадженні передових методів для забезпечення ефективності та конкурентоспроможності. Однією з ключових галузей, де виникає потреба в новаторських рішеннях, є машинобудування. Ринок виробництва машинобудівної продукції у світі є досить різноманітний. Для створення конкурентоспроможної продукції необхідно, щоб вона мала високі якісні характеристики і невисоку вартість в порівнянні з аналогічною продукцією інших виробників.

Термін експлуатації і надійність виготовленої продукції прямо залежить не лише від використовуваних технологій, устаткування і матеріалів, але і від інших складових виробничого процесу. Кваліфіковані інженерно-технічні працівники, а також високопродуктивне і прогресивне устаткування дозволяє підприємствам-виробникам впроваджувати новітні технологічні процеси для виготовлення надійних агрегатів, що відповідають високому якісному рівню та сучасним технічним вимогам. Застосування генеративного дизайну в машинобудуванні є однією з перспективних та перевірених стратегій для оптимізації конструкцій та процесів виробництва.

Генеративний дизайн представляє собою підхід, що базується на використанні алгоритмів та штучного інтелекту для створення інноваційних та оптимальних концепцій дизайну. У машинобудуванні цей підхід може бути використаний для автоматизації процесів проектування, оптимізації структурних рішень, покращення вагових характеристик та зменшення споживання матеріалів. Завдяки генеративному дизайну маємо можливість не лише ефективно використовувати ресурси, але й вдосконалювати та прискорювати процеси проектування та виробництва.

У даній дипломній роботі проведено обґрунтування актуальності використання програмних продуктів для генеративного дизайну в машинобудуванні. Проведено аналіз сучасних тенденцій щодо популярності

застосування цього підходу в промисловості. Крім того, показано методику вибору раціонального програмного продукту для генеративного дизайну.

Мета цієї роботи - висвітлити актуальність технологій генеративного дизайну для оптимізації процесів машинобудування та запропонувати методику вибору необхідного програмного продукту для навчального процесу та здійснення проектних розрахунків для забезпечення стійкості та конкурентоспроможності підприємства в сучасній промисловості.

У цьому плані тематика дипломної роботи є актуальною.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз службового призначення та технологічності деталі

Стійка ЖВМ 22.122.19 є елементом конструкції вузла домкрату оприскувача сільськогосподарських культур. Деталь застосовують для кріплення та з'єднання 3-х деталей в рідинно-передавальній системі такого оприскувача.

Задана деталь «Стійка ЖВМ 22.122.19» має прямокутний профіль у поперечному її перерізі. Вона має форму куба зі закругленнями на нижній площині та внутрішніми отворами різного діаметру, осі яких перетинаються під прямим кутом. Деталь може бути вписана в куб $65,0\text{мм} \times 35,0\text{мм} \times 45,0\text{мм}$.

«Стійка ЖВМ 22.122.19» виготовлена із конструкційної вуглецевої якісної сталі AISI 1045 (згідно стандарту США). Для виконання своїх функцій необхідне застосування термічної обробки до твердості 240...290 HB і хімічного фосфатного оксидування поверхонь, що необхідне для захисту робочих поверхонь від корозії. Українським аналогом такого матеріалу є сталь 45 згідно ГОСТ 1050.

Завдяки поєднанню низької вартості і високих експлуатаційних характеристик таку сталь широко застосовують в будівельних і машинобудівних сферах, переробній промисловості, сільськогосподарському машинобудуванні. Зокрема таку сталь часто використовують в металоконструкціях (фасонний і арматурний прокат), а також у виробництві деталей різного функціонального призначення: валів, осей, фланців, шестерень, дисків і траверс. У рідкісних випадках марку сталі AISI 1045 використовують при виготовленні великогабаритних механізмів.

Площина стійки, яка служить для з'єднання з суміжною циліндричною поверхнею має радіусне закруглення R76 мм. Таке конструктивне виконання зумовлено необхідністю зварювання деталі ЖВМ 22.122.19 із опорним кронштейном ЖВМ 22.122.76 за допомогою ручної дугової зварки в середовищі вуглекислого газу проволокою MSG2-GZ-60 G DIN8555.

Загалом, зовнішні окремі плоскі поверхні деталі є негабаритними і зручними для їх використання у вигляді технологічних баз при механічному її обробленні.

Усі розміри на кресленні показані правильно та достатньо деталізують та охоплюють усі конструктивні елементи деталі. Вони є зручними для їх контролювання за допомогою універсального вимірювального інструменту.

Шорсткість поверхонь деталі є адекватною до точності розмірів деталі.

Для зменшення коефіцієнту концентрації напружень, зменшення ймовірності руйнування та відповідно збільшення терміну служби стійки всі переходи між діаметрами отворів виконані із необхідними закругленнями з невеликим значенням показників шорсткості.

1.2 Поняття про генеративний дизайн та задачі досліджень

Однією із новітніх технологій оптимізації конструкцій виробів є генеративний дизайн, який також відомий під назвою генеративне проектування. Згаданий генеративний дизайн є підходом до проектування, який використовує алгоритми та комп'ютерні програми для автоматичного створення різноманітних варіантів конструктивного виконання деталі із заданими параметрами і обмеженнями. Цей підхід спрямований на створення не одного конкретного дизайну, а на генерацію широкого спектру можливих рішень, здатних задовольнити визначені критерії.

Основна ідея полягає в тому, щоб використовувати комп'ютер для створення та оцінки множинних варіаційних концепцій, що дозволяє визначити оптимальні або оптимізовані технічні рішення.

Популярні методи генеративного дизайну включають в себе еволюційне програмування, генетичні алгоритми, нейромережеві підходи та інші. Ці методи використовуються для створення різних форм, структур, а також для вирішення оптимізаційних завдань.

На даний час існує велика кількість CAD/CAE-систем та підходів реалізації такої технології проектування. Від правильного вибору програмного продукту в значній мірі залежить рівень деталізації та завершеності проектних розрахунків.

Тому для ефективного використання технологій генеративного дизайну актуальним є вирішення таких завдань:

1. Аналіз динаміки патентних потоків щодо вдосконалення технологій генеративного дизайну
2. Моніторинг використання програмних продуктів для генеративного дизайну
3. Вибір програмних продуктів для реалізації технологій генеративного дизайну виробів у машинобудуванні на основі використання методу аналізу ієрархій.

1.3 Висновки до розділу

Основними викликами у проектуванні технологічного процесу виготовлення деталі є вибір і економічне обґрунтування способу отримання заготовки, визначення методів обробки та контролю її результатів, вибір необхідного технологічного устаткування, формування оптимального технологічного маршруту для виготовлення деталі, проведення розрахунків щодо припусків на обробку і розмірів початкової, проміжної та кінцевої заготовок, вибір технологічних пристроїв, ріжучих та вимірювальних інструментів, а також розробка маршрутів та оперативних етапів технологічного процесу виготовлення такої деталі.

Введені інновації в технологічний процес дозволять знизити вартість виробництва деталі за рахунок зменшення часу, витраченого на обробку. Крім того, оптимізація послідовності операцій дозволить скоротити час на підготовку та завершення виробництва.

Для ефективного використання технологій генеративного дизайну сформовано завдання для подальших досліджень.

2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1 Аналіз динаміки патентних потоків щодо вдосконалення технологій генеративного дизайну

Бурхливий розвиток за останнє десятиліття адитивних технологій, штучного інтелекту та хмарних обчислень зумовили появу нових технологій проектування. Однією із таких технологій є генеративний дизайн.

На основі інформаційної системи “World intellectual property organization (WIPO)”, що базується на базі даних PATENTSCOPE проведено дослідження динаміки патентування технічних рішень стосовно технологій генеративного дизайну (рис. 2.1, 2.2). Як відомо, динаміка патентування демонструє зміну інтересу у винахідництві до розглядуваного об’єкту досліджень за визначений період часу [24, 20]. Із рисунків ми бачимо, що домінуюча роль у впровадженні та вдосконаленні технологій генеративного дизайну належить таким країнам як Китай, США, країни Європейського Союзу, Індія, Японія, Корея, Канада. Велика кількість документів інтелектуальної власності у міжнародній патентній системі РСТ та в Європейському Патентному Офісі є елементом підтвердження актуальності такої теми.

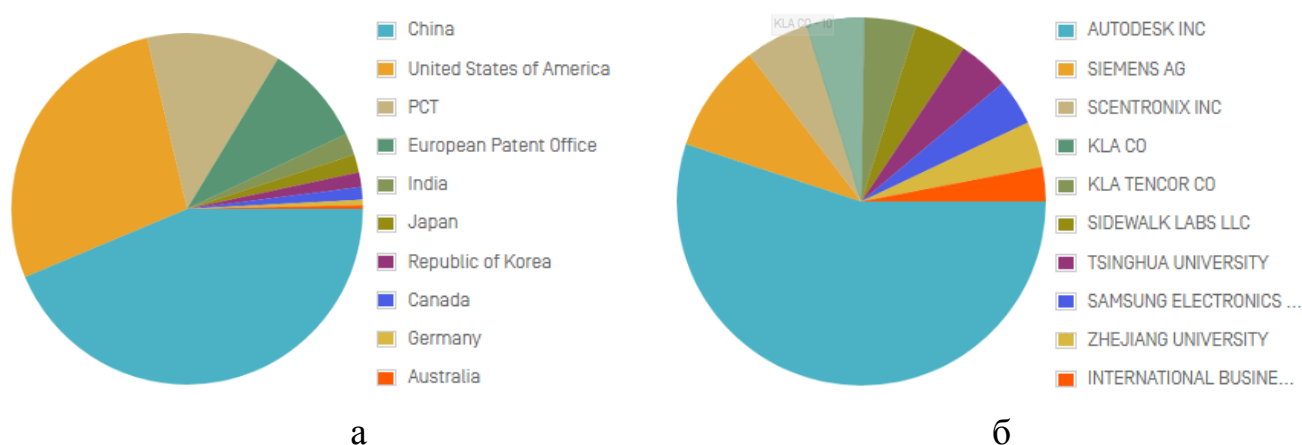


Рисунок 2.1 – Діаграма обсягу патентування розробок стосовно технологій генеративного дизайну у різних країнах світу (а) різними компаніями (б)

Ми можемо поділити всю патентну документацію щодо генеративного дизайну за кодами міжнародного класифікатора патентів на дві групи. Перша група охоплює такі тематики: розроблення та вдосконалення згаданого методу з використанням методів обробки цифрових даних (G06F), комп'ютерні системи (G06N), генерація даних зображення (G06T), маркування носіїв інформації цифровим кодом (G06K), регулюючі та керуючі системи (G05B), розпізнавання зображень (G06V), інформаційні та комунікаційні технології (G06Q)). Друга група стосується прикладного використання технологій генеративного дизайну (технології отримання 3D об'єктів додатковим нанесенням, додатковою агломерацією або додатковим нашаруванням, матеріалу (B33Y), формування чи з'єднання пластиків; формування матеріалів у пластичному стані; виготовлення шаруватих продуктів або виробів шляхом з'єднання попередньо не з'єднаних шарів в один шаруватий продукт (B29C)).

Ми бачимо стійкі тенденції зростання активного інтересу до технологій генеративного дизайну, особливо починаючи з 2019 р. за результатами аналізу динаміки патентних потоків по роках (рис. 2.2) Це зумовлено розширенням можливостей практичної реалізації продуктів такого генеративного дизайну засобами адитивних технологій та вдосконаленням функціональних можливостей методу його програмної реалізації.

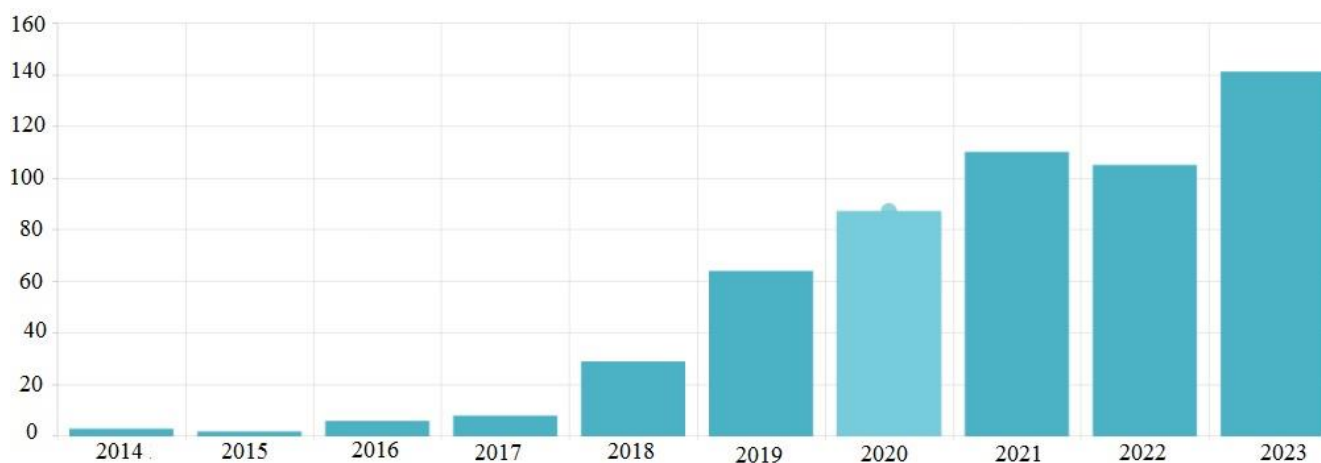


Рисунок 2.2 – Динаміка патентних потоків за 10 років інтересу до технологій генеративного дизайну

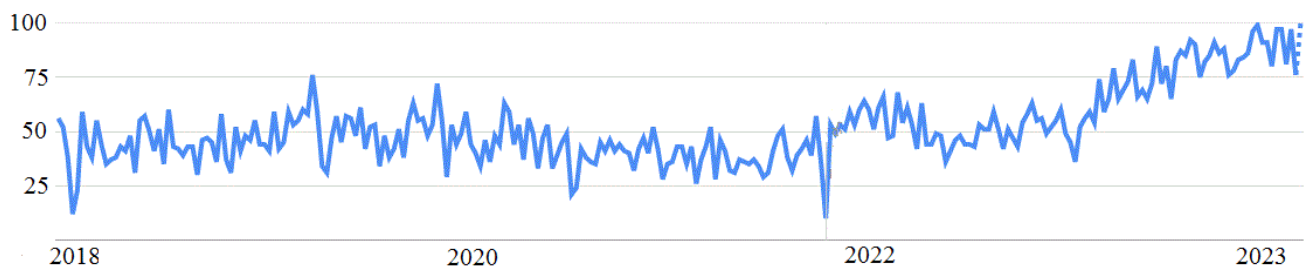


Рисунок 2.3 – Динаміка популярності технологій генеративного дизайну за роками

Окремі елементи генеративного дизайну реалізовані в програмних продуктах різних фірм. Однак провідну роль у розвитку такого методу належать показаним на рис. 2.1 б інституціям. Також ми бачимо зростання динаміки обсягу використання технологій генеративного дизайну для вирішення прикладних задач за останні 5 років на основі статистики пошукових запитів у мережі інтернет (рис. 2.3). У цьому плані список країн-лідерів є такою: 1 Китай, 2 Сінгапур, 3 Республіка Корея, 4 Гонконг, 5 Нідерланди.

Причини зростання популярності генеративного дизайну є такі. В автоматизованих системах згаданий метод дозволяє ефективно економити часові ресурси при розробці виробів і створювати індивідуальні продукти, що відповідають потребам конкретного клієнта. Генеративний дизайн не обмежується класичними методами проектування, дозволяючи інженерам працювати з інноваційними альтернативними технічними рішеннями. Синтезований виріб є унікальним і не базується на готових шаблонах та стереотипах. Результат проектування обмежений лише параметрами, які визначені конструктором на початковому етапі проектних робіт.

2.2 Моніторинг використання програмних продуктів для генеративного дизайну

Однією із прогресивних технологій вдосконалення виробів у машинобудуванні є генеративний дизайн. Такий метод проектування базується на застосуванні спеціалізованого програмного забезпечення. Воно використовує

генетичні алгоритми в комбінації з обчислювальними технологіями кінцево-елементного аналізу, які здатні самостійно без участі конструктора генерувати тривимірні моделі, що відповідають заданим умовам. Такий метод синтезу машинобудівних виробів є одним із методів топологічної оптимізації. Він забезпечує оптимізацію геометрії моделі деталі за критерієм мінімізації маси з метою зниження витрат на матеріал при заданих умовах закріплення і навантаження. Зокрема він дозволяє знизити вагу виробів без погіршення характеристик міцності, оптимізувати витрати матеріалу, відповідно знижуючи вартість виробу. Результат генеративного аналізу відображається у вигляді оптимізованої деталі з новою конфігурацією. Потім здійснюють дослідження напружено-деформованого стану такої тривимірної моделі з детальним аналізом напружень та переміщень спричинених дією силових факторів на деталь. Для цього використовують модулі експрес-аналізу спеціалізованих програмних продуктів (ANSYS, T-FLEX Analysis, система аналізу міцності APM FEM для КОМПАС-3D, модуль Simulation в Solid Edge та ін.). Отримане в результаті генеративного дизайну фасетне тверде тіло експортують у файл формату STL або 3MF для подальшого 3D друку. Однак необхідно зауважити, що широко використовуваний формат STEP не підтримує фасетні дані. Тому експортувати або перетворити отримане фасетне тіло у STEP чи PARASOLID формат є складно. Основними методами виготовлення таких деталей є адитивні технології, а також лиття металів та сплавів, формування з полімерних матеріалів, кераміки та гуми, зварювання, та комбінації згаданих методів.

Нами проведено моніторинг популярності програмних продуктів генеративного дизайну на основі використання бази даних PATENTSCOPE інформаційної системи “World intellectual property ORGANIZATION”, та результатах дослідження статистики пошукових запитів у мережі інтернет.

В результаті таких досліджень ми виділили такі програмні продукти для генеративного дизайну:

Fusion 360 в основному поширений в США та країнах центральної та західної Європи (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Динаміка використання програмного продукту Fusion 360 generative design

Altair Inspire. Модуль OptiStruct (рис. 2.5) здобув популярності у таких країнах: Корея, Німеччина, Швеція, Італія, Індія. Інший модуль SimSolid (рис. 2.6), який є складовим елементом згаданої програми, набуває все більшого використання в таких країнах як Німеччина, Франція, Великобританія, Японія, Італія. Однак модуль SimSolid згаданого програмного продукту не набув популярності.

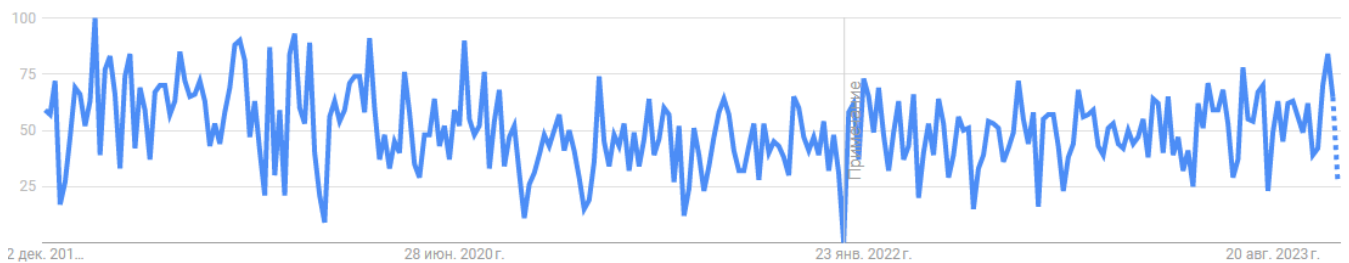


Рисунок 2.5 – Динаміка використання програмного продукту OptiStruct (Корея, Німеччина, Швеція, Італія, Індія)



Рисунок 2.6 – Динаміка використання програмного продукту SimSolid у Німеччині, Франції, Великобританії, Японії та Італії

nTopology є перспективним програмним продуктом з широкими можливостями (рис. 2.7). Програма користується популярністю в таких країнах: США, Італія, Німеччина, Канада, Великобританія.

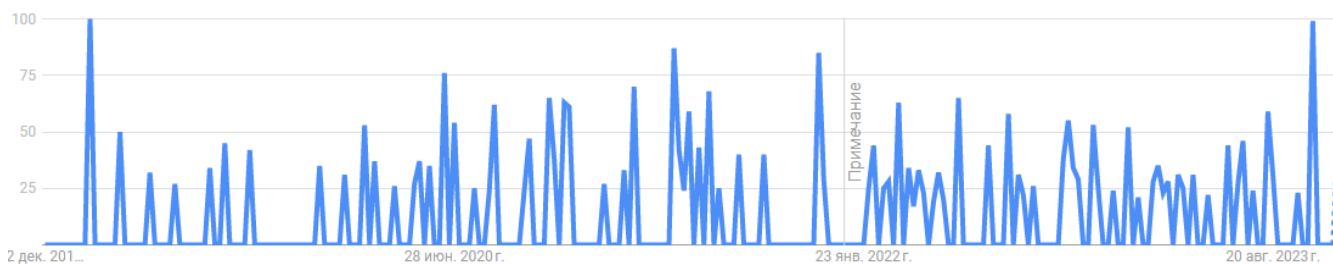


Рисунок 2.7 – Динаміка використання програмного продукту Generative Topology Optimization

Ansys (рис. 2.8). Модуль Mechanical набуває усе більшої популярності в таких країнах: Корея, Німеччина, Австралія, Індія, Тайвань. Обсяг використання іншого модуля Discovery Ansys (рис. 2.9) залишається на постійному рівні високим в країнах: Швеція, Німеччина, Японія, Великобританія, Канада.

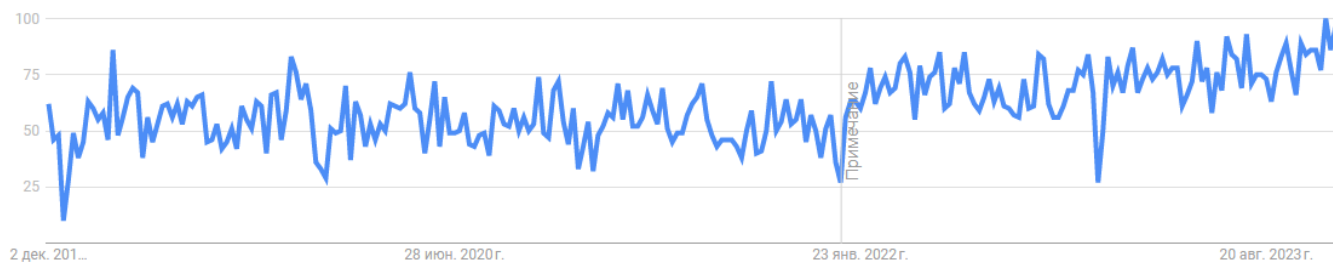


Рисунок 2.8 – Динаміка використання програмного продукту модуля Mechanical Ansys

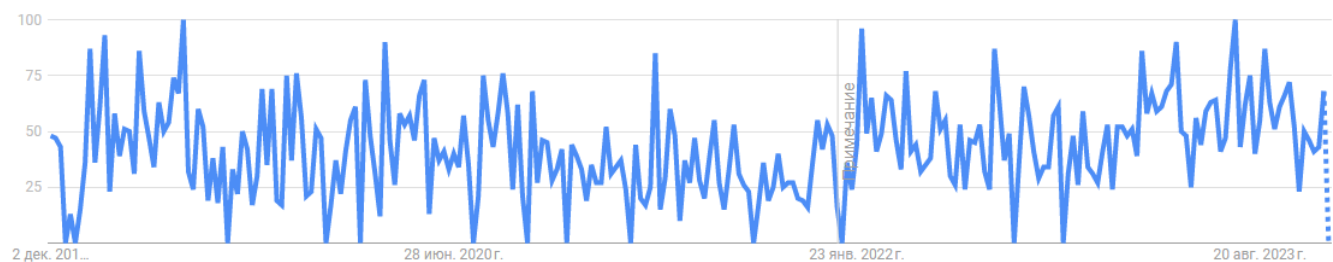


Рисунок 2.9 – Динаміка використання модуля Discovery Ansys

Creo Generative Design. Модулі Generative Topology Optimization (рис. 2.10, 2.11) та хмарне розширення Generative Design Extension є малопопулярними (рис. 2.12).



Рисунок 2.10 – Динаміка популярності програми Creo Generative Design

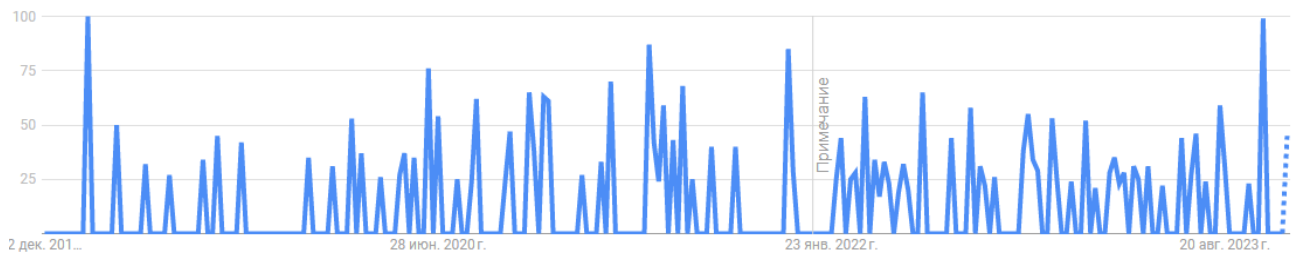


Рисунок 2.11 – Динаміка популярності модуля Generative Topology Optimization



Рисунок 2.12 – Динаміка популярності модуля Generative Design Engineering

nTop Platform не набув популярності.

CATIA. Модуль Generative Design Engineering (рис. 2.13) на платформі 3D EXPERIENCE® є малопопулярним і найчастіше використовується в Індії.

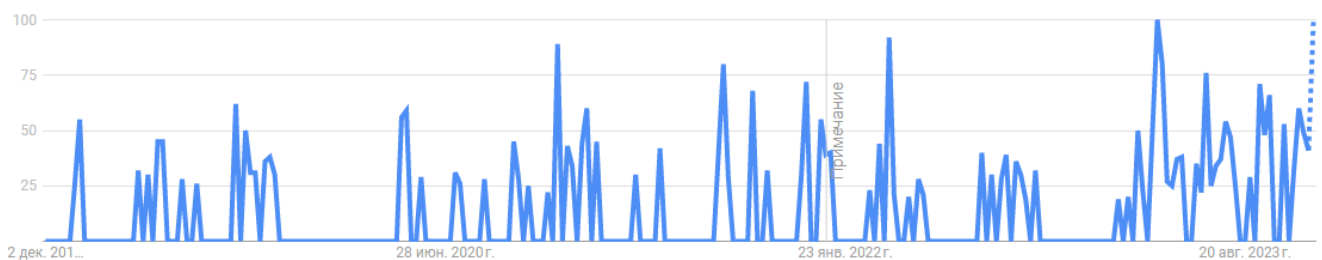


Рисунок 2.13 – Динаміка використання програмного продукту CATIA, модуля Generative Design

Siemens NX. Модуль Design Space Explorer (рис. 2.14, 2.15) використовується переважно в США, Німеччині, Австрії, Бельгії та Нідерландах.



Рисунок 2.14 – Динаміка використання програмного продукту Siemens NX модуля Design Space Explorer.



Рисунок 2.15 – Динаміка використання програмного продукту Siemens NX

APEX і CogniCAD (рис. 2.16) використовуються не часто.



Рисунок 2.16 – Динаміка використання програмного продукту CogniCAD

Bentley Systems (рис. 2.17). Програмний продукт має обмежене використання, яке сконцентроване в основному в Литві, Сінгапурі, Ірландії та Австралії.



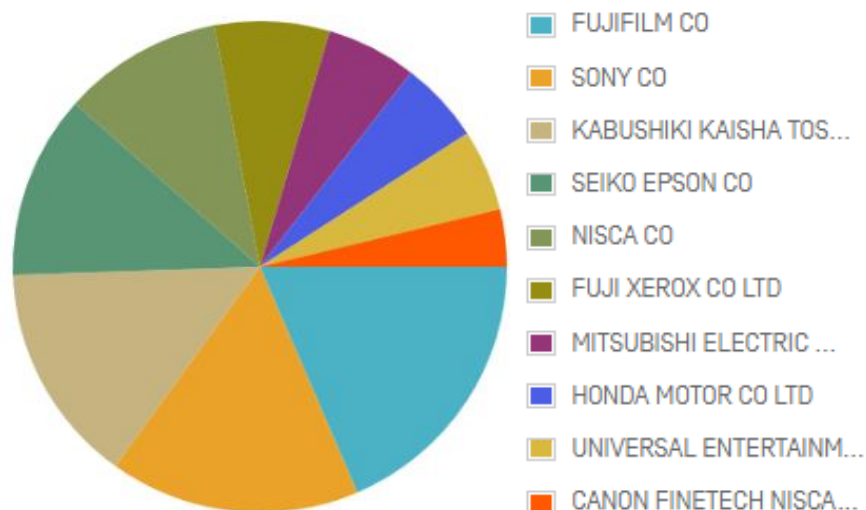
Рисунок 2.17 – Динаміка використання програмного продукту Bentley Systems

Autodesk Spacemaker (рис. 2.18). Програмний продукт не є популярним. Таку програму здебільшого використовують в Норвегії, США та Індії.



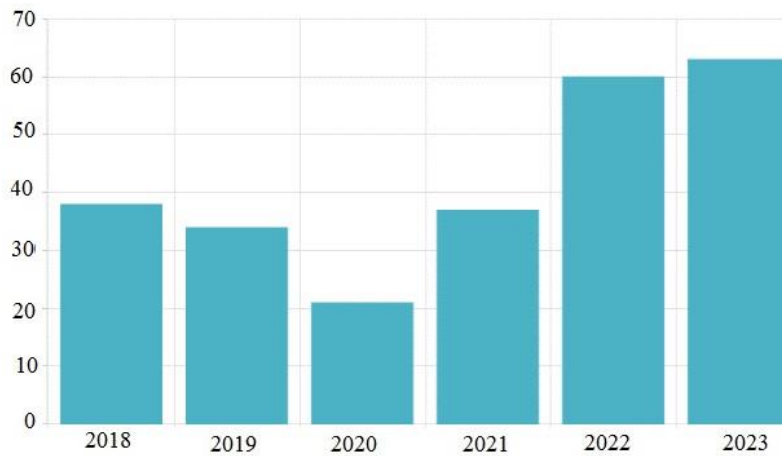
Рисунок 2.18 – Динаміка використання програмного продукту Autodesk Spacemaker

Solid Edge. Найчастіше використовується в таких країнах: США, Канада, Великобританія, країни центральної та західної Європи, Індія, Філіпіни, Ізраїль (рис. 2.19 а). Ми бачимо чіткі тенденції зростання популярності такої програми з 2019 року (рис. 2.19 б). Це спричинено появою нової версії програмного продукту Solid Edge 2019, у якій доступна розширена вкладка технологічних параметрів для редагування синтезованої конструкції деталі.



a

Рисунок 2.19 – Використання програми Solid Edge німецького концерну Siemens AG різними компаніями (а) за останні 6 років (б)



б

Продовження рисунка 2.19

Одже, програні продукти для генеративного дизайну набувають усе більшого використання. Їх впровадження базується на можливостях інформаційно-комунікаційних технологій і технічних засобів конкретних промислових підприємств.

2.3 Використання методу аналізу ієрархій для вибору програмних продуктів для реалізації технологій генеративного дизайну виробів у машинобудуванні

Одним із прогресивних сучасних методів проектування машинобудівних виробів є генеративний дизайн. Він базується на застосуванні спеціалізованого програмного забезпечення. Методика генеративного дизайну реалізована в таких програмних продуктах: Solid Edge, Altair Inspire (модулі AltairOptiStruct, MotionSolve, SimSolid і OptiStruct), nTopology, Ansys (модулі Mechanical, Discovery), Fusion 360, Creo Generative Design (модулі Generative Topology Optimization (GTO) та хмарне розширення Generative Design Extension (GDX)), nTop Platform, CATIA (модуль Generative Design Engineering (GDE) на платформі 3D EXPERIENCE®), Siemens NX (модуль Design Space Explorer), APEX (модуль Apex Generative Design), CogniCAD, Bentley Systems, Autodesk Spacemaker, SOLIDWORKS та ін.

Зважаючи на широку номенклатуру таких програмних продуктів існує необхідність у виборі його конкретного варіанту для конкретних умов виробництва. Це можна здійснювати на основі використання методу аналізу ієрархій (the Analytic Hierarchy Process, MAI) за допомогою комп'ютерної програми MPRIORITY 1.0.

Згаданий метод найчастіше використовують для вирішення інженерних задач в таких країнах: Китай, Індонезія, Німеччина, Нідерланди, Індія (2.20).



Рисунок 2.20 – Динаміка використання методу аналізу ієрархій

Для застосування такого методу доцільно використовувати запропоновану нами ієрархічну структуру (рис. 2.21), яка об'єднує мету вибору, критерії та альтернативи, які будуть впливати на вибір конкретного технічного рішення.

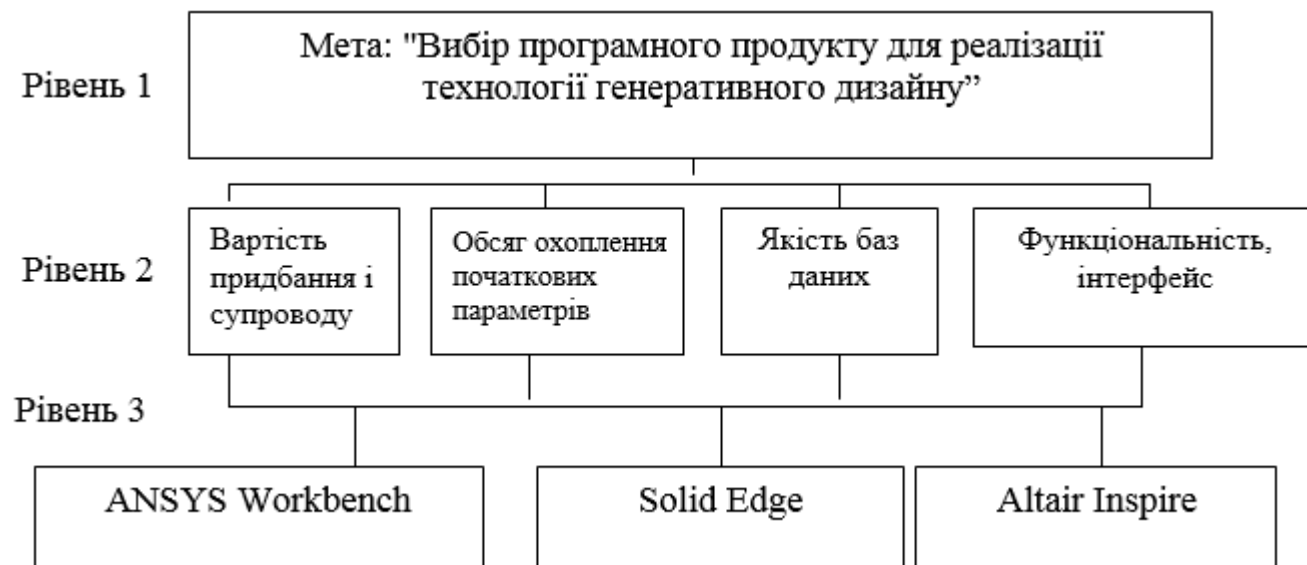


Рисунок 2.21 – Фрагмент ієрархії проблеми вибору раціонального програмного продукту для реалізації технології генеративного дизайну

Об'єктом дослідження обрано програмні продукти: Solid Edge 2019, ANSYS Workbench та Altair Inspire. Критеріями є: вартість придбання і супроводу програмного продукту, обсяг охоплення початкових параметрів, якість баз даних, функціональність та інтерфейс.

У процесі реалізації методу аналізу ієрархій здійснювали попарні порівняння згаданих критеріїв між собою та альтернатив (програмних продуктів) за кожним із критеріїв за допомогою шкали співвідношень (шкала від 1 до 9, де 1 - "рівнозначно", 9 - "абсолютно важливо"). Підсумковим результатом виконаних попарних порівнянь у програмі MPRIORITY 1.0 є візуалізація діаграми, що демонструє пріоритети згаданих програмних продуктів (рис. 2.22). Із діаграми бачимо, що оптимальною альтернативою є програмний продукт Solid Edge 2019. Це зумовлено такими твердженнями.

1. Форми представлення отриманих результатів значно відрізняються від тих, які отримані в середовищі програми Solid Edge. В програмних продуктах ANSYS Workbench та Altair Inspire синтезовані геометричні форми мають обривчасту ламану криволінійну форму.

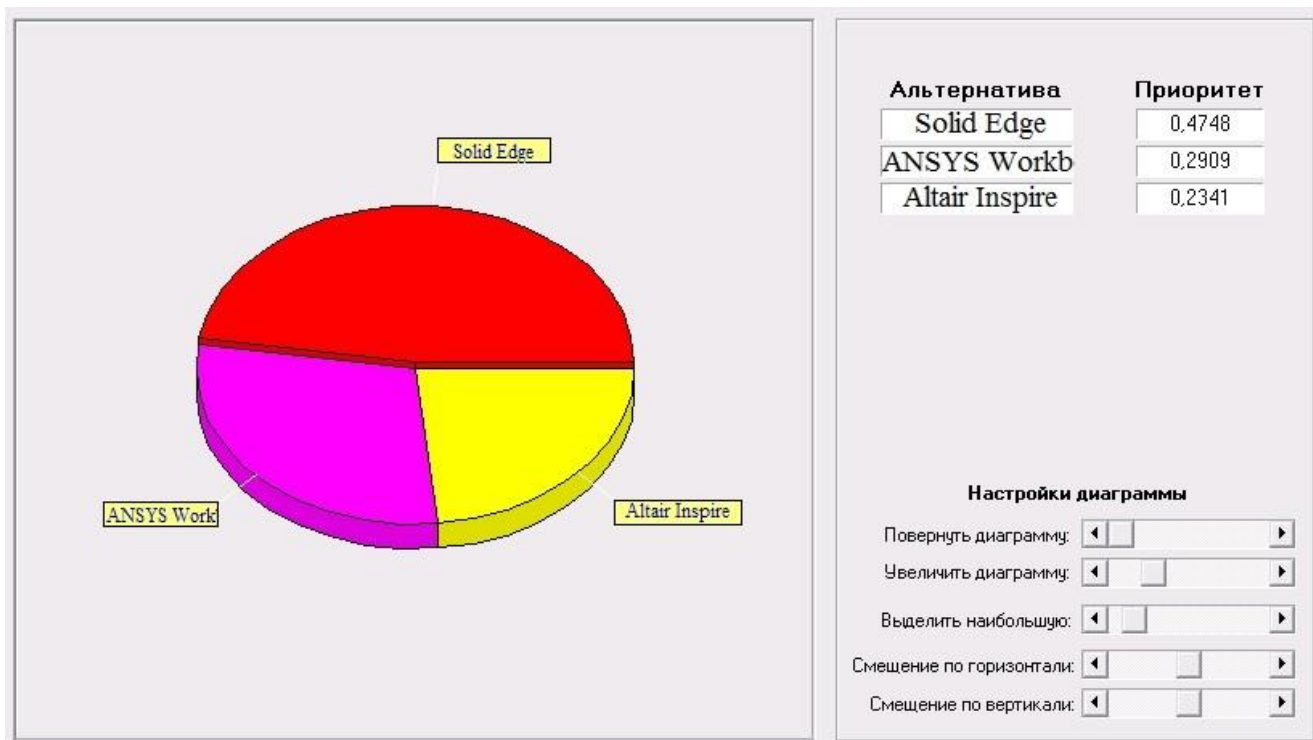


Рисунок 2.22 – Діаграма пріоритетності варіантів програмних продуктів

2. Продуктом генеративного дизайну є вироби, які мають аморфну форму, в якій відсутні плоскі поверхні, прямі лінії. Останні мають криволінійну геометрію, яка може бути описана здебільшого сплайн-кривими другого порядку. Це ускладнює виготовлення синтезованих виробів. Їх виробництво на базується на використанні переважно адитивних технологій. Однак у версії програмного продукту Solid Edge 2019 доступна розширена вкладка технологічних параметрів. Вона дозволяє здійснити редагування елементів конструкції деталі, яка отримана в результаті класичного генеративного аналізу 3D-моделі. Це здійснюється шляхом спрощення форми вибраних складних елементів конструкції з використанням стандартних плоских та об'ємних геометричних фігур. При цьому поверхні отриманої деталі можуть прилягати до зовнішніх крайок початкової деталі. Це дозволяє проектувати конструкції деталей, які наближені до класичних форм виробів (містять плоскі грані, циліндричні поверхні тощо). За рахунок цього вони можуть бути виготовлені з використанням класичних методів обробки матеріалів.

Метод аналізу ієрархій може бути використаний для вибору необхідних програмних продуктів для генеративного дизайну із ширшого переліку програмних продуктів та більшої кількості критеріїв. Зауважимо, що з метою отримання найменшої похибки у розрахунках, при складанні списку альтернатив та критеріїв необхідно використовувати оптимальне число Мюллера, тобто не більше 5-9 елементів на кожному із ієрархічних рівнів критеріїв та альтернатив.

2.4 Висновки до розділу

1. Застосування продуктів генеративного дизайну набуває все більшого поширення, що обумовлено використанням інформаційно-комунікаційних технологій та технічних засобів конкретних промислових підприємств. Зростання популярності генеративного дизайну має кілька обґрунтованих причин. У відомих автоматизованих системах цей метод дозволяє значно економити час при розробці виробів та створювати індивідуальні продукти, що відповідають конкретним потребам замовника. Відмінність генеративного дизайну полягає в тому, що він

не обмежений стандартними методами проектування, дозволяючи інженерам використовувати інноваційні технічні рішення. Створений продукт є унікальним і не ґрунтується на заздалегідь визначених шаблонах (темплетах) або стереотипах. Результати проектування визначаються лише параметрами, які конструктор встановлює на початковому етапі робіт.

2. Метод аналізу ієрархій може бути використаний для вибору необхідних програмних продуктів для генеративного дизайну із широкого переліку програмних продуктів та великої кількості критеріїв.

3. Програмний продукт Solid Edge 2019 доцільно використовувати при оптимізації конструкції деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» та реалізації технології її виготовлення способом 3D друкування.

4. Викладені матеріали опубліковані в тезах [6, 7, 9] науково-технічної конференції “Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні”, яка відбулася нещодавно в м. Одеса 6-7 грудня 2023 р.

3 ТЕХНОЛОГІЧНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Вибір та економічне обґрунтування способу отримання заготовки

Вибір найраціональнішого способу отримання заготовки для деталі “Стійка” ми здійснюємо на основі розрахунків показників ефективності використання матеріалу і величини скорочення працемісткості механічного оброблення, використовуючи рекомендації, описані в працях [18, 19].

З урахуванням вимог креслення за результатами аналізу конструкції деталі ми приходимо до висновку, що початковою заготовкою може бути круглий або квадратний прокат. Важливим етапом розрахунків є порівняння значень коефіцієнтів точності за масою для обох таких методів. Для цього спочатку ми створюємо 3D моделі заготовок та деталі (рис. А.1 додатку А) у середовищі програмного продукту Solid Edge, використовуючи методи ескізного або параметричного проектування і креслення, які детально описані в працях [1-4].

Враховуючи особливості конструктивного виконання деталі згідно креслення і за результатами аналізу геометричних параметрів деталі ми прийшли до висновку, що заготовка може бути отримана як з круглого ($\varnothing 58 \times 55$), так і квадратного (45×55) прокатів. Результати розрахунків коефіцієнтів вагової точності для обох методів є такими:

Сортовий круглий прокат
 $\varnothing 58 \times 55$

$Q_{1d} = 0,390$ кг.

$Q_{2z.circle} = 1,142$ кг

$K_{mt1} = 0,39 / 1,14 = 0,311$;

Сортовий квадратний
прокат 45×55

$Q_{1d} = 0,390$ кг.

$Q_{2z.square} = 0,881$ кг

$K_{mt2} = 0,39 / 0,88 = 0,381$.

Порівнюючи величини K_{mt1} і K_{mt2} бачимо, що в умовах дрібносерійного типу виробництва доцільно використовувати квадратний прокат, що характеризується меншим значенням показника коефіцієнта вагової точності.

Для визначення доцільності вибору методів отримання заготовок проведемо економічний розрахунок.

Показник вартості заготовки за кожним із варіантів визначаємо за відомою

формулою [2]:

$$M = Q_3 * S_k * K_{Tv} - q_v * B_{waste}, \quad (3.1)$$

де S_k – ринкова оптова ціна одиниці ваги матеріалу, грн.;

K_{Tv} – коефіцієнт, що враховує транспортно-заготівельні витрати;

q_v – загальна маса технологічних відходів, кг;

B_{waste} – показник ціни 1 кг відходів, грн.

$$M_{circle} = 26,1 \text{ грн.}; \quad M_{square} = 25,2 \text{ грн.}$$

Отже, різниця вартостей вибраних варіантів заготовок є такою:

$$A = P_1 - P_2, ,$$

де P_1, P_2 – вартості відповідно першого та другого видів заготовок, грн.

Як бачимо, відсутня суттєва різниця між заготовками за пріоритетністю, так як заготовки за вартістю майже однакові.

Як відомо, показником переваги одного способу над іншим є показники продуктивності праці і мінімальної собівартості отримання заготовки.

Для цього визначаємо річну економію матеріалу для обох варіантів [19]:

$$E_M = \frac{G_d(K_1 - K_2)}{K_1 K_2} N \quad (3.3)$$

де G_d – маса стійки, кг;

K_1 і K_2 – коефіцієнт використання матеріалу (КВМ) для кожної з видів початкових заготовок;

N – величина річної програми випуску деталей.

Підставивши необхідні дані у таку формулу, ми отримали $E_M = 22,71$ кг.

Отже, річна економія за показником вартості заготовок є відсутньою:

Як відомо, повну річну економію від упровадження нових видів заготовок з урахуванням скорочення витрат на механічну обробку визначаємо за формулою [19]:

$$\Xi = \Xi_{с.з.} + (Z_1 - Z_2) \left(1 + \frac{H}{100}\right) N$$

де Z_1 і Z_2 – величини основної заробітної плати виробничих робітників за двома варіантами і на тих технологічних операціях механічного оброблення, де

відбувається зміна величин припусків на обробку, грн;

H – усереднені цехові накладні витрати (приймають в межах 170 – 300 %).

Величину основної заробітної плати виробничих робітників за виконання однієї операції $U_{\text{опр}}$ [18, 19] ми визначаємо за формулою:

$$U_{\text{опр}} = S_{M3} \cdot T_{\text{шт}};$$

де S_{M3} – величина хвилинної заробітної плати для даного розряду роботи, грн.;

$T_{\text{шт}}$ – величина штучного часу на тих операціях механічного оброблення, де відбувається зміна величини припуску при обробленні, хв.

Хвилинну заробітну плату ми визначаємо так:

$$S_{M3} = S_s \cdot m,$$

де S_s – годинна ставка роботи робітника, яка залежить від розряду його роботи, грн.;

m – тарифний коефіцієнт відповідного розряду роботи згаданого робітника.

$$S_{M3} = 26,914 \text{ грн.},$$

Сумарна заробітна плата за усіма операціями:

$$F_{\text{оп}} = \sum_{i=1}^n S_{M3} T_{\text{шт}},$$

де n – кількість операцій технологічного процесу.

$$F_{\text{оп1}} = 26,914 \cdot 2,4 = 64,59 \text{ грн}, \quad F_{\text{оп2}} = 26,914 \cdot 2,22 = 59,74 \text{ грн},$$

Отже, повна річна економія від впровадження обраних видів заготовок з урахуванням скорочення витрат на механічне оброблення:

$$E_M = 4,84 \text{ тис. грн},$$

Таким чином, для деталі «Сійка» метод отримання заготовки із прокату квадратного перетину є найдоцільнішим. Початковою заготовкою нами обрано прокат 45,0×55,0 мм.

3.2 Вибір методів обробки заготовки деталі «Стійка»

Методи обробки ми визначаємо для усіх поверхонь стійки в залежності від показників точності та шорсткості. Результат вибору заносимо у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Структура плану оброблення основних поверхонь заготовки

Розмірна характеристика поверхні деталі	Розмірна характеристика вимог до обраної поверхні згідно даних креслення деталі		Технологічні та розмірні характеристики поверхні після обробки		
	Розмір	Показник шорсткості, одиниць Ra	Зміст необхідних технологічних переходів	Точність	Показник шорсткості Ra
50h14	50-0,620	10	Початкова заготовка Фрезерування	h16 h14	40 10
32 h14	32-0,620	10	Початкова заготовка Фрезерування	h16 h14	40 10
41,3 h14	41,3-0,620	0	Початкова заготовка Фрезерування	h16 h14	40 10
R75 (радіусна поверхня)	R75+0,740	10	Початкова заготовка	h16	40
			Фрезерування чорнове	h14	12,5
			Фрезерування чистове		10
Ø12H14 2 отвори	Ø12+0,430	10	Свердління	H 14	10
Ø14H14	Ø14+0,430		Свердління Фрезерування	H 14 H 12	12,5 10
Ø18H9	Ø18+0,0430	2,5	Свердління Зенкерування Розвертання	H 14 H 12 H 9	12,5 10 2,5
Ø24D10	Ø18 _{+0⁺0,065⁻¹⁴⁹}	5	Свердління Фрезерування чорнове Фрезерування чистове	H 14 H 12 D 10	12,5 10 5
Ø6 H14 2 отвори		Ø6+0,30	10	Свердління	H14

3.3 Вибір технологічних та вимірювальних баз

У спроектованому нами технологічному процесі ми реалізували виконання відомого принципу єдності баз і принципу суміщення конструкторських, технологічних і вимірювальних баз [11, 12, 26].

Ми використовуємо необроблені зовнішні поверхні деталі як технологічні бази для деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» на перших фрезерних операціях. Ми

використовуємо на наступних фрезерних операціях як бази поперецьно оброблені верхню і нижні поверхні та бокові площини.

При цьому, ми використали у всіх випадках установочну базу, яка обмежує три ступені свободи деталі. При цьому, направляюча база також обмежує її два ступені свободи. Опорна база позбавляє деталь лише однієї ступені вільності.

3.4 Технологічний маршрут виготовлення деталі “Стійка”

Ми можемо здійснювати виготовлення деталі двома способами. Один із них наведено у таблиці А.1 у додатку А. Однак він характеризується використанням універсального технологічного устаткування (верстати). На підприємстві машинний парк містить технологічне устаткування, яке розширює технологічні можливості отримання даної деталі.

Таблиця 3.2 – Структурна схема технологічного маршруту обробки стійки ЖВМ 22.122.19

№ з/п	Назва операції	Зміст операції	Техноологічне спорядження	Технологічні бази
1	Відрізання	Отримання заготовки з сортового прокату		
2	Термічне оброблення	Термічне оброблення до твердості НВ 235...290		
3	Фрезерування	Фрезерування сторін профілю у формі квадрату 50 та 32	Тиски	Відповідні сторони квадратного профілю
4	Фрезерування з ЧПК	Фрезерування двох фасок $1 \times 45^\circ$ сторін квадратного профілю. Свердління 2-ох отворів $\varnothing 6$ мм на глибину 32мм		
5	Фрезерування з ЧПК	Фрезерування двох фасок $1,60 \times 45^\circ$. Фрезерування закруглення радіусом 75 мм. Послідовне свердління, зенкерування, розвертання та фрезерування двох взаємоперпендикулярних отворів		
6	Слюсарна	Оброблення гострих крайок та закруглень радіусом 0,5 мм.		
7	Покриття	Покриття хімічне (фосфатування і оксидування)	Стенд	
8	Промивання	Промивання деталі	Ванна	
9	Контролювання розмірів		Стіл	

У загальному випадку, поверхні обробляються в такій послідовності: фрезерування зовнішніх поверхонь, свердління отворів, зенкерування та розвертання отворів, фрезерування фасок і закруглень. На всіх таких операціях ми можемо закріплювати заготовку в тисках. При цьому на свердлильній операції доцільно використовувати попередньо оброблені зовнішні поверхні для базування. Також ми можемо застосовувати у такій технології універсальне устаткування (з парку машинобудівного підприємства) та технологічне спорядження, а також стандартний ріжучий та вимірювальний інструменти.

Враховуючи дрібносерійний тип виробництва та відповідно до переліку металорізального устаткування, наявного на машинобудівному підприємстві нами сформовано маршрут обробки деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» (таблиця 3.2).

3.5 Вибір технологічного устаткування

Загалом на машинобудівному підприємстві використовується таке устаткування (додаток Д2):

МП6-952	Відрізний верстат
16K20	Токарно гвинторізний верстат
3A164	Круглошліфувальний верстат
Haas ST20Y	Токарний верстат з ЧПК
Haas TL 2	Токарний верстат з ЧПК
DECKEL MAHO DMC 63 V-ID16951	Фрезерний верстат з ЧПК
XL5036	Вертикально фрезерний верстат
2P135Ф2	Вертикально-свердлильний верстат з ЧПК
2A450	Координатно-розточувальний верстат
	Слюсарний стіл
	Контрольний стіл

Відповідно до розробленої структурної схеми технологічного маршруту обробки деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» бажано здійснювати відрізну операцію на абразивному відрізнному кругло пильному верстаті моделі МП6-952. Такий

верстат часто використовують для високопродуктивного розрізання чорних металів дисковими пилами Геллера у заготівельних цехах машинобудівних підприємств.

Чорнове фрезерування зовнішніх поверхонь можна здійснювати на вертикальному фрезерному верстаті XL5036. Його здебільшого використовують для виконання різноманітних фрезерних робіт: оброблення різанням різнонахилених площин, пазів, кутів, кишень, рамок, криволінійних поверхонь. Поворотна шпindelна головка верстату оснащена механізмом ручного осевого переміщення гільзи шпинделя, що дозволяє здійснювати оброблення отвору, вісь якого розташована під кутом $\pm 45^\circ$ до робочої поверхні столу.

Вертикальний фрезерний оброблювальний центр з ЧПК DECKEL MAHO DMC 63 V-ID16951 використовують для виконання різноманітних високопродуктивних фрезерних, різьбонарізних і свердлильних робіт підвищеної точності. Верстат характеризується ефективним прискоренням та великою швидкістю переміщень вздовж осей. DECKEL MAHO DMC 63 V-ID16951 відзначається невеликими габаритами і малою площею основи. Це дозволяє економити простір виробничого приміщення цеху. Згадане технологічне устаткування є ефективним в умовах дрібносерійного типу виробництва, найбільше завантажене і є відмітним у парку металорізального устаткування машинобудівного підприємства.

Отже, для оброблення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» достатньо трьох верстатів: МП6-952, XL5036 і DECKEL MAHO DMC 63 V-ID16951. Використання верстату XL5036 зумовлено завантаженістю згаданого верстата з ЧПК.

3.6 Визначення припусків на обробку та розмірів початкової заготовки

Розрахунок припусків на обробку та розмірів початкової заготовки ми здійснюємо за відомим розрахунково-аналітичним методом [21, 26]. Такий метод реалізується на основі наведених нижче аналітичних формул.

1. Розрахунок мінімальних припусків

$$2Z_{i \min} = 2[(R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\Delta_{\Sigma(i-1)}^2 + \varepsilon_i^2}],$$

2. Розрахунок максимальних припусків

$$2Z_{i \max} = 2Z_{i \min} + T_{D(i-1)} - T_{Di}$$

3. Сумарні відхилення розташування і форм поверхні

$$\Delta_{\Sigma \text{ заг.}} = \sqrt{(\Delta_y l)^2 + C_o^2}$$

4. Відхилення розташування і форм поверхні після оброблення:

$$\Delta_{\Sigma 1} = \Sigma_{\text{zag}} * J_y$$

5. Усі номінальні припуски

$$2Z_{i \text{ ном.}} = 2Z_{i \min} + |ES_{D(i-1)}| - |ES_{Di}|$$

У наведених вище формулах нами використано такі позначення:

$R_{z(i-1)}$ – висота нерівностей профілю на попередньому переході;

h_{i-1} – глибина дефектного поверхневого шару на попередньому переході;

$\Delta_{\Sigma(i-1)}$ – сумарне відхилення розташування і форми поверхні на попередньому переході;

ε_i – похибка встановлення оброблюваної заготовки на виконуваному переході (для усіх переходів 160 мкм),

Δ_y – значення граничного зміщення осі свердла ($\Delta_y = 1,3 \text{ мкм} = 0,0013 \text{ мм}$);

C_o – граничне зміщення осі отвору ($C_o = 20 \text{ мкм} = 0,020 \text{ мм}$);

l – загальна довжина просвердленого отвору ($l = 41,5 \text{ мм}$).

J_y – уточнюючий коефіцієнт: $J_y = 0,045$.

Результати розрахунку припусків для отримання поверхні внутрішнього циліндричного отвору $\varnothing 18 \text{ Н9} (^{+0,043})$ з шорсткістю $Ra_{2,5} \text{ мкм}$ наведено у таблиці 3.3.

У розрахунках прийнято: граничні відхилення проміжних розмірів є такими: $ES_1 = +0,430 \text{ мкм}$; $ES_2 = +0,180 \text{ мкм}$; $ES_3 = +0,043 \text{ мкм}$; $EI_1 = EI_2 = EI_3 = 0 \text{ мкм}$.

Структурна схема технологічного процесу отримання згаданого отвору є такою.

– свердління з допуском $T_1 = 0,630 \text{ мм}$ для досягнення шорсткості $Ra_{12,5}$;

– зенкування з допуском $T_1 = 0,190 \text{ мм}$ для досягнення шорсткості Ra_{10} ;

– розвертання з параметрами згідно креслення (допуск $T_1=0,043$ мм) для досягнення шорсткості $Ra_{2,5}$.

Граничні відхилення розмірів заготовки стійки:

$ES_{\text{заг.}}=+0,43$ мкм; $EI_{\text{заг.}}=0$ мкм.

Для першого переходу $R_{z \text{ gen.}} = 63$ мкм, $h_{\text{gen.}}=60$ мкм. Для другого переходу $R_{z1}=25$ мкм, $h_1=30$ мкм. Для третього переходу $R_{z2}=6,3$ мкм, $h_2=3,2$ мкм.

Результати розрахунків представлені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Припуски і граничні розміри отримання поверхні $\varnothing 18H9^{(+0,043)}$

Технологічні переходи обробки	Допуски T, мм	Елементи припуску, мкм				Розмірні значення припусків, мкм			Розрахун- ковий номіналь- ний розмір, мм	Граничні розміри, мм	
		Rz	h	$\Delta\Sigma$	ϵ_y	2Zi	2Zi	2Zi		max	min
						min	ном	max			
Свердління	0,63	63	80	58,65				16,643	17,064	16,634	
Зенкерування	0,19	25	40	2,83	160	580	820	820	17,463	17,634	17,454
Розвертання	0,043	6,3	3,2	2,27	160	420	560	540	18,0	18,043	18,0
Загальний припуск						980	1367	1370			

Для зручності користування технологічною документацією при виготовленні деталі ми приймаємо наступні значення номінальних розмірів із збереженням встановлених допусків за усіма переходами:

Після свердління - $\varnothing 16,633^{+0,43}$

Після зенкування - $\varnothing 17,453^{+0,18}$

Після розвертання - $\varnothing 18^{+0,043}$

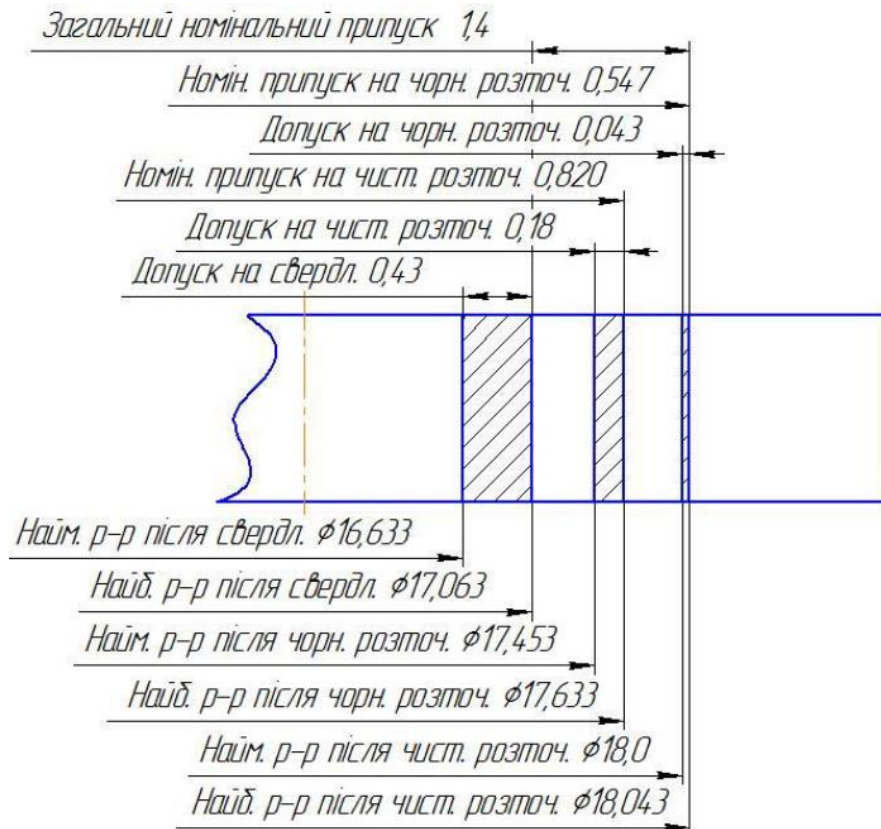


Рисунок 3.1 – Схема розташування припусків та допусків при отриманні отвору $\text{Ø}18^{+0,043}$

3.7 Розмірний аналіз технологічного процесу

Розмірний аналіз технологічного процесу виконуємо за методиками, які висвітлені у працях [21, 26]. Його здійснюємо для лінійних і координатних розмірів поверхонь, отриманих на операції фрезерного оброблення.

Для виявлення технологічних розмірних ланцюгів ми використовуємо теорію графів.

Граф комплексу розмірів для даної деталі представлено нижче на рисунку 3.2.

На основі цього розроблені відповідні розмірні ланцюги, які зображені на рисунку 3.3.

Операційні допуски ми визначаємо з умов забезпечення економічної точності методу обробки за довідниками та за результатами розрахунку розмірних ланцюгів.

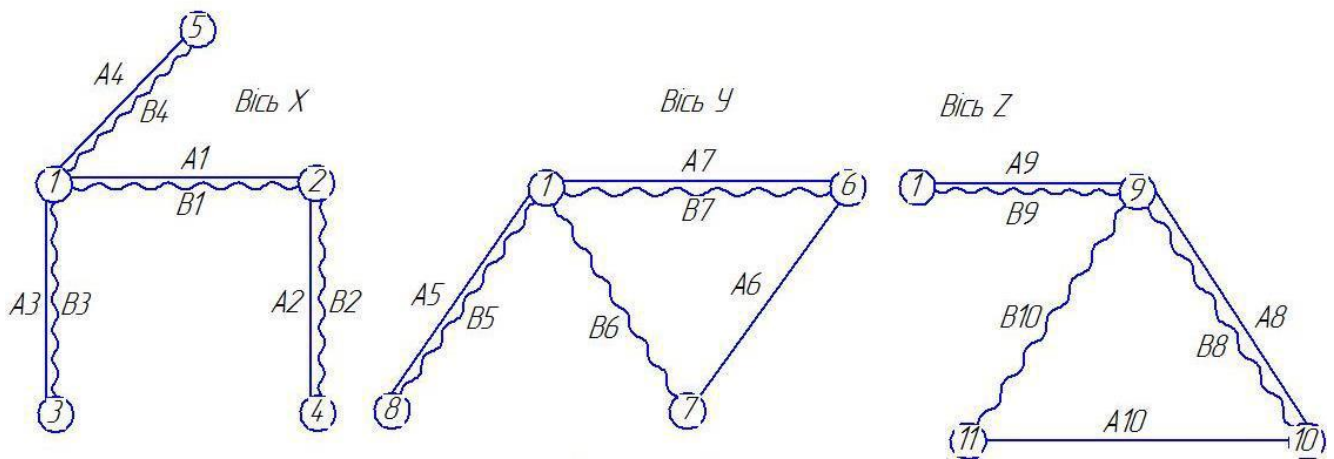


Рисунок 3.2 – Графи розмірів стійки ЖВМ 23.122.19

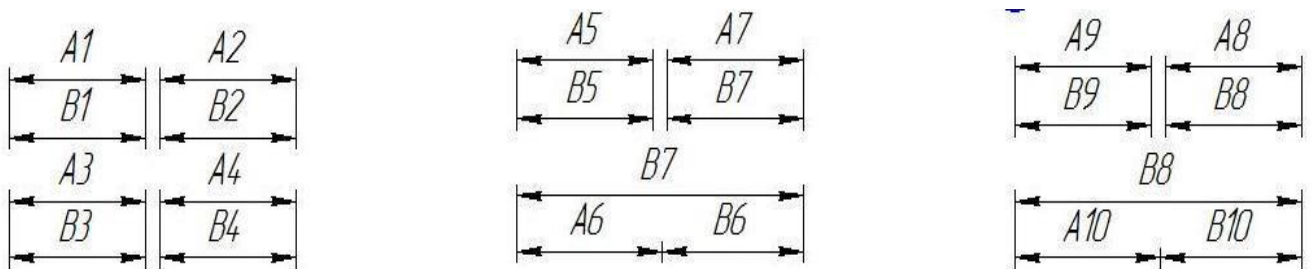


Рисунок 3.3 – Схеми технологічних розмірних ланцюгів

Із рисунків бачимо, що технологічні розміри $A_1 - A_9$ збігаються з розмірами конструкторськими $B_1 - B_9$.

Ми повинні визначити граничні відхилення розміру B_6 в ланцюгу по осі Y , та граничні відхилення розміру B_{10} в ланцюгу по осі Z . Граничні відхилення

розміру B_6 є такими $\Delta A_6 = 15 \pm 0,5$ мм; $T_\Delta = 1$ мм. Потім визначаємо сере дній

допуск замикаючого ланцюга: $T_{cp} = \frac{T_\Delta}{n}$. $T_{cp} = 0,5$ мм; $B_7 = 52_{-0,82}$ мм; $T_{B_7} = 0,62$

мм. Приймаємо $T_{B_7} = 0,50$ мм, $B_7 = 52_{-0,5}$ мм. Тоді відхилення на розмір B_{12} :

$$ESA_\Delta = ESB_7 - EIB_6$$

$$0,5 = 0 - EIB_6;$$

$$-0,5 = -0,5 - ESB_6;$$

$$EIB_6 = 0 - 0,5 = -0,5 \quad EIA_\Delta = EIB_7 - ESB_6, \quad ESB_6 = -0,5 + 0,5 = 0 \quad B_6 = 35_{-0,5} \text{ мм.}$$

На основі цього ми визначаємо граничні відхилення розміру B_{10} .

$$\Delta A_{10} = 22 \pm 1 \text{ мм; } T_\Delta = 2 \text{ мм.}$$

Отже середній допуск замикаючого ланцюга: $T_{sr} = 1,0$ мм. Ми приймаємо $B_8=39,9_{-0,62}$ мм; $TB_8=0,62$ мм. $B_8=39,9_{-0,62}$ мм; Потім ми визначаємо відхилення на розмір B_{10} :

$$1 = 0 - EIB_{10}; \quad -1 = -0,62 - ESB_{10};$$

$$EIB_{10} = 0 - 1 = -1 \text{ мм} \quad ESB_{10} = -0,62 + 1 = 0,38 \text{ мм}; \quad B_{10} = 17,9_{-1}^{+0,38} \text{ мм.}$$

Загалом визначаємо операційні розміри з допусками шляхом нарощування допусків і припусків, починаючи з останньої операції та закінчуючи першою операцією. Таким чином, граничні припуски розраховуємо розрахунково-аналітичним методом. Результати розмірного аналізу ТП виготовлення стійки наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунків припусків та допусків між операціями ТП

Розмір поверхні деталі	Технологічні переходи	Допуск	Припуск між операціями	Розмір між операціями
50h14	Заготовка	1,6	-	Ø 55-1,9
	Фрезерування	0,62	2x2,5	Ø 50-0,62
32 h14	Заготовка	3,0	-	Ø 45-1,6
	Фрезерування	0,62	2x6,5	Ø 32-0,62
41,3 h14	Заготовка	3,0	-	Ø 45-1,6
	Фрезерування	0,62	2x1,85	Ø 41,3-0,62
Ø12H14	Свердління	0,43	2x6	Ø 12 ^{+0,43}
Ø14H14		0,43	2x6	Ø 12 ^{+0,43}
Ø18H9	Фрезерування	0,18	2x1	Ø 14 ^{+0,43}
	Свердління	0,43	2x6	Ø 12 ^{+0,43}
	Зенкерування	0,18	2x2,75	Ø 17,5 ^{+0,18}
	Розвертання	0,043	2x0,25	Ø 18 ^{-0,043}
Ø24D10	Свердління	0,43	2x6	Ø 18 ^{+0,043}
	Фрезерування чорнове	0,25	2x2,5	Ø 23 ^{+0,21}
	Фрезерування чистове	0,214	2x0,5	Ø 24 ^{+0,214}

3.8 Вибір технологічного спорядження

Заготовку деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19», що підлягає обробленню на декількох верстатах доцільно закріпити у затискних тисках, якими укомплектовано технологічне фрезерне устаткування.

3.9 Вибір ріжучих та вимірювальних інструментів

Ми здійснюємо вибір різального та допоміжного інструментів з урахуванням характеру виробництва, методу обробки, типу устаткування, розмірів, конфігурації і матеріалу оброблюваної заготовки, необхідних параметрів якості і точності поверхні. При цьому нами враховано технологічні можливості підприємства, а саме перелік існуючого на підприємстві ріжучого та вимірювального інструментів.

Для фрезерування і свердління нами вибрано такі інструменти:

1. Торцева фреза Р6М5 ГОСТ 26697-85
2. Торцева фреза CoroMill 424-062Q24-14Н, пластина CoroMill 430R-2406M-PH 4330.
3. Торцева фреза CoroMill R314-058C7-14Н, пластина CoroMill R350-1605 14M-PM 4560.
4. Твердосплавне свердло CoroDrill 880.2-0320-048A1-PM 4545.
5. Зенкер CoroDrill 860.1-0800-028B1-PM 2534 Ø17, IT8-10, Ra 1-2 мкм
6. Профільна фреза CoroMill RA400-165R39-18M, пластина CoroMill R490-19 08 32M-PM 4560.
7. Розвертка CoroDrill 860.1-0800-028A1-PM 2534 Ø18, IT8-10, Ra 1-2 мкм
8. Твердосплавне сверло CoroMill 880.2-1460-068A1-PM 4565.
9. Твердосплавна кінцева фреза CoroMill Plura 3F35-1000-060-PC 1840.
10. Твердосплавна кінцева фреза CoroMill Plura 3F357-1000-300-PC 1840.
11. Твердосплавна кінцева фреза CoroMill Plura 3F458-1380-042-PC 1840.

Усі ріжучі та допоміжні інструменти для оброблення деталі для кожної операції описані в комплекті технологічної документації, який наведено у

додатку.

Вимірювання внутрішніх діаметрів і зовнішніх поверхонь доцільно здійснювати на основі використання універсальних інструментів та приладів: штангенциркулі, мікрометри, глибиноміри, а також шаблони.

Такі засоби контролю для кожної операції описані в комплекті технологічної документації (вони подані у додатку). Там є зазначено їх найменування та вимірювані розміри.

3.10 Маршрутний та операційний ТП виготовлення стійки

Ми розробляємо технологічний процес (маршрутний, операційний) на кожну операцію з відповідними картами ескізів на основі розробленого плану маршруту обробки деталі. При цьому враховуємо список існуючого на підприємстві технологічного устаткування, спорядження та вимірювального інструменту. Керуюча програма розроблена в програмі «SolidCAM» і представлена в додатку Д.

3.11 Розрахунок режимів різання

Як відомо, розрахунок режимів різання виконують за допомогою різних методів (табличний; аналітичний (використовуючи нормативно-довідкову літературу); графоаналітичний; автоматизований, який реалізується в різних програмних середовищах).

У процесі визначення режимів різання враховують різну інформацію, як от: марку матеріалу та його властивості, такі як твердість та границя міцності на розтяг. Також важлива класифікаційна група матеріалів, до якої відноситься матеріал оброблюваної заготовки (наприклад, сплав на титановій основі, високоміцна сталь, жароміцна сталь), розмежована за значеннями границі міцності (> 1000 МПа, < 1000 МПа).

Інші фактори, які враховуються, включають глибину виготовленого отвору, класифікацію матеріалу ріжучої частини інструменту (наприклад, швидкорізальна

сталь, така як P18 або P9K5, або твердосплав, такий як ВК8 і інші), стан заточення інструменту (подвійне заточення з підточеною перемичкою або одинарне заточування), наявність системи охолодження, а також конкретний вид охолодження (наприклад, емульсія і т. д.).

Інші важливі аспекти включають довжину інструменту, що впливає на його жорсткість (визначається відношенням довжини до діаметру), рівень жорсткості технологічної системи (недостатній, середній, малий), потрібну точність отвору для визначення необхідності подальшого технологічного оброблення, характер поверхні (глибокий отвір, перехідний, наскрізний), показник стійкості інструменту для заданого діаметру, тип початкової заготовки (лита, штампована, пресована) та тип операції (свердління, фрезерування і т. д.).

Для операцій, які реалізуються з використанням універсального технологічного устаткування ми визначали режими різання, використовуючи стандартні методики, що описані в працях [22, 26].

Зокрема швидкість різання при фрезеруванні визначають за формулою

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^u \cdot Z^p} \cdot K_v$$

Потім визначають частоту обертання шпинделя за формулою

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D},$$

На основі отриманих даних розраховують силу і потужність різання

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_{zd}^y \cdot B^u \cdot Z}{D^q \cdot n_{II}^w} \cdot K_{\mu p},$$

$$N_{різ} = \frac{P_z \cdot V_d}{1020 \cdot 60}$$

Розрахунок режимів різання на окремі операції обробки деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» можна здійснювати у різних програмних продуктах.

Існує кілька таких комп'ютерних програм для розрахунку режимів різання та інших параметрів обробки матеріалів. Деякі з них спрямовані на певні галузі, а інші є універсальними. Можна виділити декілька програм, які використовуються для розрахунків режимів різання:

Cutting Tool Selector (CTS): Це програмне забезпечення від Sandvik

Coromant, яке допомагає вибирати оптимальні інструменти та режими різання для конкретних завдань обробки матеріалів.

G-Wizard Calculator: Розроблений CNCCookbook. Це калькулятор режимів різання використовують для оптимізації швидкості різання, подачі та глибини різання для фрезерування та токарної обробки.

MachiningCloud: Це хмарне програмне забезпечення, яке надає доступ до великої бази даних з інструментами та допомагає вибирати оптимальні параметри різання.

FEAsoft Tool Manager - програмне забезпечення для управління інструментами та розрахунку режимів різання для фрезерування.

Kennametal NOVO - платформа дозволяє вибирати інструменти та розраховувати режими різання для обробки різних матеріалів.

Helical Tool - Machining Advisor Pro допомагає вибирати інструменти та оптимізувати режими різання для фрезерування в залежності від конкретного завдання.

Розрахунок режимів різання на окремі операції обробки деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» ми здійснювали за аналітичними формулами у програмі «Wolfram Mathematica».

Для подальшого проектування спорядження для закріплення деталі на операції “Фрезерування з ЧПК” ми наведемо елементи розрахунку сили різання при фрезеруванні радіусного закруглення.

Початкові умови для розрахунків: глибина різання $t = 1,4$ мм; подача на зуб фрези $S_z = 0,05$ мм; ширина фрези $B = 4,50$ мм; діаметр фрези $D = 4,8$ мм; кількість зубів фрези $z = 5$; частота обертання фрези $n = 80$ об/хв, коефіцієнт запасу для компенсації можливих випадкових відхилень силових факторів від розрахованих значень $K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 = 2,96$ ($K_0 - K_6$ - уточнюючі коефіцієнти, які враховують стан базових поверхонь, затуплення інструменту, вплив ударних навантажень на інструмент, стабільність сил, які розвиваються приводом, зручність управління затискним механізмом з ручним приводом, розташування опорних точок при зміщенні).

За результатами розрахунків ми отримали $P_z = 760$ Н.

Для операції оброблення поверхонь деталі на верстаті з ЧПК визначення режимів різання здійснюємо за методикою фірми Sandvik Coromant (рис. 3.4).

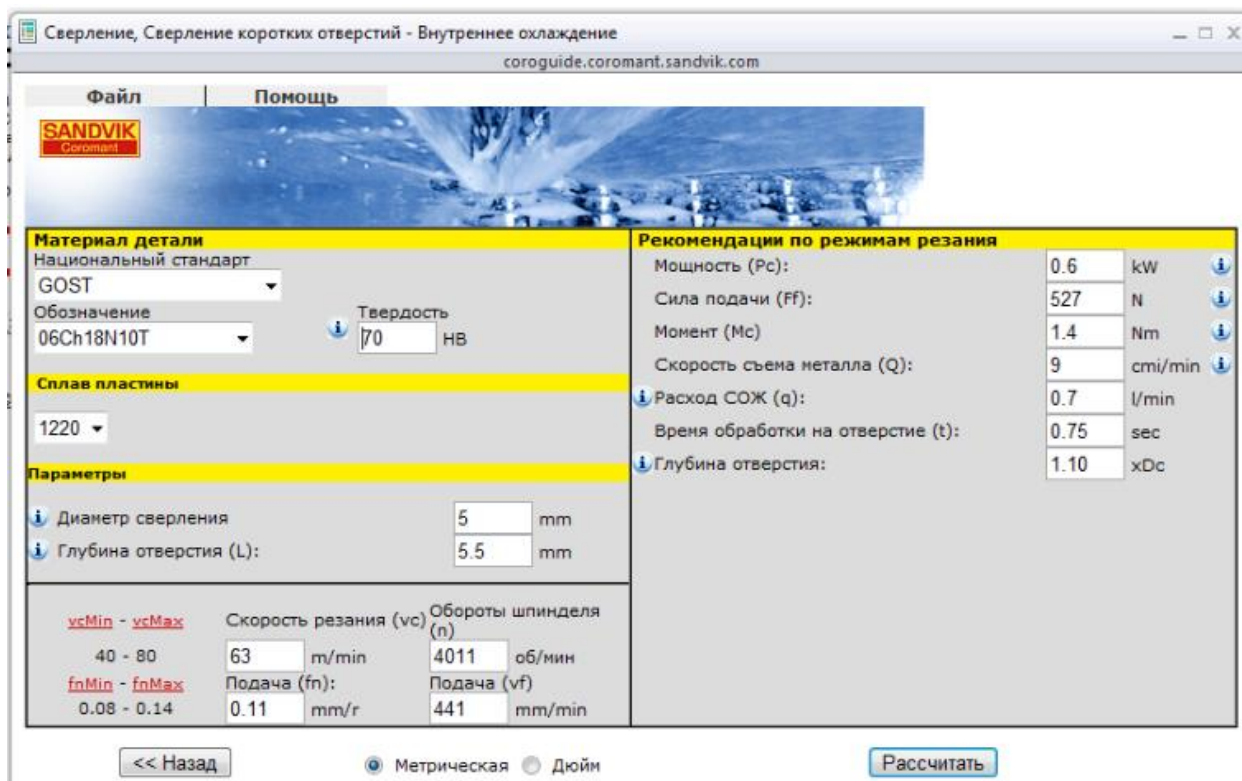


Рисунок 3.4 - Загальний вигляд діалогового вікна програми Cutting Tool Selector для розрахунку режимів різання при свердлінні за методикою фірми Sandvik Coromant

3.12 Технічне нормування технологічного процесу

Технічне нормування технологічного процесу ми здійснювали за відомими методиками [22, 26] з використанням нормативів.

У таких розрахунках ми визначали такі параметри (одиницею вимірів кожного показника є хвилина):

$T_{\text{шт.к}}$ – норма штучно-калькуляційного часу;

$T_{\text{оп}}$ - оперативний час;

T_0 – основний технологічний час;

T_a – додатковий (допоміжний) час;

T_{sht} – норма штучного часу;

$T_{п.з}$ – норма підготовче-заключного часу на партію;

n – розмір партії деталей, шт.

T_{teh} – час технічного обслуговування робочого місця;

T_{org} – час організаційного обслуговування робочого місця;

T_{gap} – час перерв.

Таблиця 3.5 – Зведена відомість норм часу операцій ТП

№ операції	Найменування операції	T_o	T_a	T_{op}	T_{teh}	T_{org}	$T_{отд}$	T_{sht}	$T_{пз}$	$T_{sht.к}$
005	Відрізання	2,022	0,655	2,455	0,078	0,082	0,09	2,67	0,21	2,87
010	Фрезерування	0,736	3,55	3,912	0,228	0,27	0,30	4,80	16,90	22,05
015	Фрезерування з ЧПК	34,018	5,633	33,02	0,912	1,492	0,95	38,40	15,980	53,34
	Установ 1 Установ 2	20,076	4,045	22,97	0,874	0,897	0,78	26,86	12,90	37,95
025	Слюсарна операція	2,953	0,00	2,91	0,223	0,224	0,22	3,9	0,00	3,95
030	Промивання	1,389	0,00	1,42	0,124	0,26	0,25	1,80	0,00	2,15
035	Контролювання розмірів	4,966	0,00	4,940	0,255	0,31	0,24	5,80	0,00	6,915
	Σ	66,245						82,92		128,08

У розрахунках основного часу ми враховували розрахункову довжину обробки ($L_p = l + l_{vr} + l_{per}$) і хвилину подачу S_m .

Результати розрахунку норм часу на всі операції оброблення деталі «Стійка ЖВМ 23.122.19» представлено у таблиці 3.5.

3.13 Розроблення технологічних наладок

Ми розробляємо схеми технологічних наладок на технологічні переходи фрезерної операції з ЧПК. Вони містять ескіз оброблюваної заготовки (в довільному масштабі), розміри з граничними відхиленнями і шорсткістю, позначення технологічних баз, напрямок робочих рухів різальних інструментів і

заготовки, зображення ріжучого інструменту в кінці робочого ходу, спосіб кріплення інструменту на верстаті, інформацію про назву операції, найменування і модель верстату, технологічне пристосування, ріжучий інструмент та режими оброблення.

3.14 Розрахунок пристрою для закріплення заготовки деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» на фрезерному верстаті

3.14.1 Початкова інформація для проектування технологічного спорядження для закріплення деталі

Завданням є обґрунтування вибору технологічного спорядження для закріплення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» на операції “Фрезерування з ЧПК”. Технологічне устаткування – фрезерний верстат моделі DOOSAN DAEWOO MYNX 550-ID16920. Ріжучий інструмент – фреза профільна CoroMill R390-070Q27-17H. Маса деталі – 0,394 кг. Штучний час на операцію $T_{шт}=25,55$ хв. Кількість робочих змін $m=1$ (дійсний річний фонд часу $F_d=2020$ годин). Програма випуску $N_v=200$ штук.

3.14.2 Вибір принципової схеми пристосування

Ми розраховуємо величину такту випуску

$$\tau = \frac{60 m \cdot F_d}{N_v} \quad (3. 26)$$

Отже $\tau=616$.

Умова застосування на даному етапі обробки одного одномісного пристосування є такою: штучний час повинен бути меншим за величину такту випуску. У даному випадку

$$25,55 < 616$$

Таким чином ми бачимо, що задана виробнича програма може бути виконана із застосуванням одномісного пристосування. Це є характерним для дрібносерійного типу виробництва.

Вибір принципової схеми пристосування базується на особливостях форми деталі. Деталь належить до технологічного класу призм. Нижче на рисунку 3.5 показано установчу, направляючу та опорні бази оброблюваної деталі.

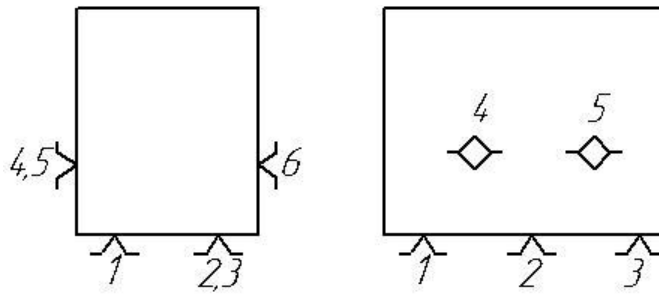


Рисунок 3.5 – Схема базування

3.14.3 Силовий розрахунок технологічного спорядження для закріплення деталі

Вихідними параметром для силового розрахунку пристрою для закріплення деталі є сила різання при фрезеруванні радіусного закруглення. Із розрахунків, які наведені у розділі 3.11 ми бачимо, що у процесі обробки заданої поверхні зі сторони ріжучого інструменту на деталь буде діяти сила різання (максимальна колова сила $P_z = 760$ Н і вага тіла $G=3,94$ Н).

Для забезпечення фіксації деталі відносно пристосування в процесі оброблення необхідно визначити силу закріплення Q .

Із умови попередження зсуву деталі уздовж осі при її базуванні в тисках, рівняння рівноваги сил [12] є такими:

$K \cdot P_z = F_{mp1} + F_{mp2}$; $K \cdot P_z = Q \cdot f_1 + Q \cdot f_2$; $F_{mp1} = Q \cdot f_1$; $F_{mp2} = Q \cdot f_2$; $K \cdot P_z = Q(f_1 + f_2)$;
звідки

$$Q = \frac{K \cdot P_z}{(f_1 + f_2)}$$

Ми вважаємо, що коефіцієнт запасу для компенсації можливих випадкових відхилень силових факторів від розрахованих значень $K= 2,96$ (розділ 3.11).

В результаті проведених розрахунків ми отримали $Q=6339$ Н.

Ми можемо забезпечити необхідну силу закріплення Q моментом сили затягування W (сила, яка прикладена до рукоятки ключа).

Величину сили затягування ми визначаємо за формулою

$$W = \frac{Q}{i},$$

де i – коефіцієнт передавального відношення.

Для гвинтового затискного механізму:

$$i = \frac{l}{r_{\text{ср}} \cdot \text{tg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}})}$$

де l – довжина вильоту ключа, мм;

$r_{\text{ср}}$ – середній радіус різі гвинта, мм;

α – стандартний кут підйому витка різі ($3^{\circ}20'$);

$\varphi_{\text{пр}}$ – середній кут тертя в різьбовому спряженні ($6^{\circ}40'$).

Значення розмірів l і $r_{\text{ср}}$ ми визначаємо за величиною номінального діаметру різі гвинта

$$d = C \sqrt{\frac{Q}{[\sigma]_p}},$$

де C – коефіцієнт, $C=1,4$;

$[\sigma]_p$ – допустиме напруження на розтяг матеріалу гвинта (9000 Н/см^2 .)

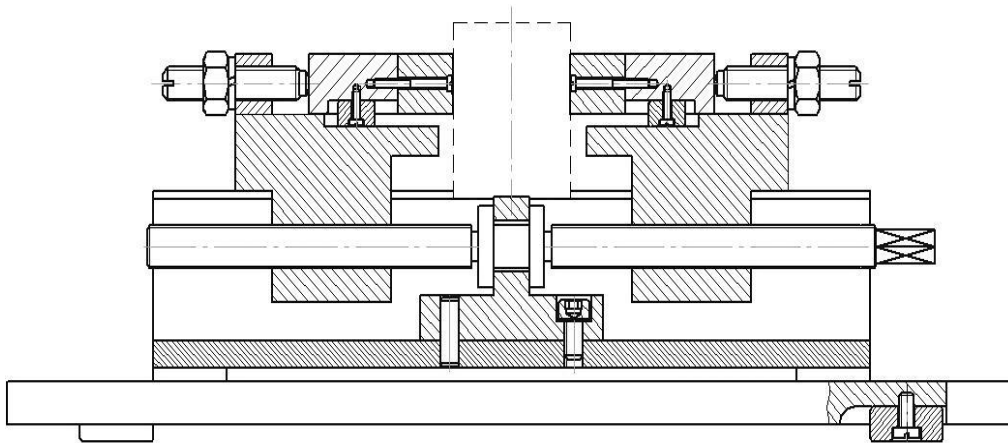


Рисунок 3.6 – Схема верстатного пристрою для закріплення заготовки

Номінальний діаметр різі гвинта $d=11$ мм. Таке значення є еквівалентне стандартному діаметру М10.

Потім за наведеними формулами ми розраховуємо середній радіус різі $r_{\text{ср}} = 4,52$ мм і довжину вильоту ключа $l=14 \cdot 10=140$ мм, а також величину сили, яку необхідно прикласти до рукоятки ключа: $W=38$ Н.

Як відомо, стандартні граничні фізичні можливості середньостатистичного робітника дорівнюють 50Н. Отже, такий спосіб закріплення ми можемо реалізувати на виробництві.

Схему вибраного пристрою для затиску наведено на рисунку 3.6.

3.15. Розрахунок точності пристрою для закріплення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19»

Умовою ефективного використання пристрою для закріплення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» є забезпечення необхідного рівня точності отримання розміру 39,9-0,62 мм. При цьому дійсна величина похибки пристосування ε має бути меншою за допустиму величину похибки пристосування $[\varepsilon]$, тобто

$$\varepsilon \leq [\varepsilon].$$

Останній параметр залежить від допуску на розмір T , ($T=0,62$ мм), середньої економічної точності ϖ даного виду оброблення при фрезеруванні ($\varpi=0,62$ мм) та уточнюючого коефіцієнта k_y ($k_y = 0,7$), які пов'язані між собою за такою формулою

$$[\varepsilon] = T - k_y \cdot \varpi$$

$$\text{Отже } [\varepsilon] = 0,62 - 0,7 \cdot 0,62 = 0,269 \text{ мм}$$

У свою чергу, величина дійсної похибки пристосування залежить від трьох похибок: похибки базування ε_b , похибки закріплення ε_z та похибки розміщення ε_n .

$$\varepsilon = (\varepsilon_b^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_n^2)^{0,5},$$

де $\varepsilon_b=0$ мкм, так як технологічна та вимірювальна баз співпадають, $\varepsilon_z=0$ мкм, так як лінія дії зусилля закріплення є перпендикулярною до напрямку виконуваного розміру.

Тому $\varepsilon_n = \varepsilon$.

Величину ε_n ми визначаємо за формулою

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_y^2 + \varepsilon_c^2 + \varepsilon_n^2}$$

де ε_y – похибка, яка спричинена неточністю виготовлення деталей пристосування та їх складання (в основному, неточністю установчих елементів);

ε_c - похибка, яка спричинена неточністю установки пристосування на столі;

ε_u - похибка, зумовлена лінійним зносом робочих поверхонь установчих елементів.

Для одномісного пристосування $\varepsilon_y = \varepsilon_c = 0$. Такі похибки можуть бути компенсовані відповідним налаштуванням елементів технологічної системи.

Ми визначаємо похибку, яка спричинена лінійним зносом робочих поверхонь установчих елементів за такою формулою

$$\varepsilon_u = \beta \cdot \sqrt{N} \cdot \cos \alpha,$$

де β – емпіричний коефіцієнт, що враховує вплив умов оброблення на величину зношення, вид і стан базової поверхні заготовки, а також вид установчого елемента, $\beta = 0,5$;

N – кількість контактів установчого елемента із заготовкою у процесі її експлуатації, яка дорівнює величині виробничої програми для даної деталі;

α – кут, утворений між напрямком виконуваного розміру та напрямком, який є перпендикулярний до поверхні установчого елемента в зоні спряження із заготовкою

$$\text{Отже } \varepsilon_u = 7,083$$

Потім ми розраховуємо дійсну похибку пристосування

$$(0^2 + 0^2 + 7,083^2)^{0,5} = 7,083.$$

Так як $7,083 \text{ мкм} < 269 \text{ мкм}$, то технологічне пристосування забезпечує необхідний рівень точності обробки.

3.16 Розрахунок кількості устаткування та показників його використання для дільниці цеху

Розрахунок кількості устаткування базується на величині працемісткості [12-16], яка характеризує виготовлення річної програми деталі, тобто $T_{det} = 200 \cdot 2,2 = 440$ нормо годин.

Потім ми визначаємо верстатну місткість (одиниця виміру - верстатна година) за формулою:

$$T_{sm\ det.} = T_{det} \cdot K_{m.o.},$$

де $K_{m.o.}$ – середній коефіцієнт багатOVERстатного обслуговування по типу виробництва ($K_{m.o.} = 1,3$).

$$T_{sm\ det.} = 572 \text{ верст. год.}$$

Кількість технологічного устаткування ми визначаємо за такою формулою

$$C_{p.обц.} = \frac{T}{F_d \cdot K_{zcp.}}$$

У формулі ми врахували верстатну місткість T річного випуску у верстатних годинах усіх виробів виробничої програми дільниці, середній коефіцієнт $K_{zcp.}$ завантаження по дільниці (ми вибираємо залежно від типу виробництва; для дрібносерійного виробництва він дорівнює 0,85), фонд часу F_d роботи устаткування.

Коефіцієнт завантаження за типами верстатів ми визначаємо за формулою:

$$K_z = \frac{C_{p.type}}{C_{pr.}},$$

де $C_{pr.}$ – прийнята кількість верстатів даного типу;

Результати розрахунків подані у таблиці 3.6.

Для виконання виробничої програми дільниці необхідно – 3 верстата різних модифікацій. Мінімальна виробнича площа для виконання виробничої програми виготовлення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» згідно укрупненого методу розрахунків становить $3 \cdot 20 = 60 \text{ м}^2$. Для обслуговування таких верстатів потрібні три робітники: один робітник для роботи на абразивному відрізнному

верстаті, один робітник для роботи на фрезерному верстаті з ЧПК та один наладчик верстатів з ЧПК.

Таблиця 3.6 – Структура верстатів на виробничій дільниці

Модель верстата	Tsht.к., хв	Tsht-к, год	T труд	Tстан	Срас	Спр	Кз
Абразивний відрізний верстат моделі МП6-952	2,79	0,048	8,95	11,96	0,008	1,0	0,007
Вертикально-фрезерний XL5036	21,25	0,352	70,18	84,1	0,05	1,0	0,0487
Фрезерний з ЧПК DECKEL МАНО DMC 63 V-ID16951	92,08	1,525	304,08	364,95	0,225	1,0	0,2165
Загальне	116,07	1,930	383,60	463,17	0,282	3,0	0,28

3.17 Розрахунок технологічної собівартості виготовлення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19»

Ми виконуємо розрахунок технологічної собівартості виготовлення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» за методикою, яка наведена у додатку Е.

У таких розрахунках ми не враховуємо витрати на амортизацію і ремонт різального та вимірювального інструменту, на допоміжні матеріали та на утримання виробничих приміщень.

Результати розрахунків зведені у таблицях 3.7-3.9.

Таблиця 3.7 – Показники розцінок згідно з розрядом роботи

Код операції	Найменування операції	Tsht.-к, хв.	Tsht.-к., год.	Розряд	Тариф, грн./год	Розцінка, грн.
5	Відрізна	2,79	0,048	4	56,94	10,686
10	Фрезерування	21,25	0,365	5	56,94	120,455
15	Фрезерування з ЧПК	54,99	1,55		69,43	428,78
	Установ 1 Установ 2	36,99		5	62,83	308,18
25	Слюсарна	4,15	0,0685	4	53,95	22,98
30	Промивання	2,24	0,035		50,90	12,99
35	Контрольна	7,24	0,122		55,90	30,69
Всього		128,96	3,27			953,89

Таблиця 3.8 – Показники розрахунку заробітної плати

Показник		Величина, грн.
Основна зар. пл.		990,95
Додаткова зар. плата, 8%		76,84
Обов'язкові відрахування 38,75%		399,99
(основна і додаткова) з відрахуваннями		1434,80
Зар. пл.	наладчика	190,99

Таблиця 3.9 – Показники собівартості одиниці продукції

№	Стаття калькуляції	Величина, грн.
1	Вартість початкової заготовки з урахуванням усіх відходів	284,07
	<i>Заробітні плати</i>	
2	виробничих робітників з урахуванням відрахувань	1456,12
3	наладчика	188,89
	<i>Витрати на</i>	
4	амортизацію устаткування	1656,16
5	ремонт устаткування	845,59
6	на експлуатацію та амортизацію спец. пристосувань	18,08
7	силову електроенергію повітря і технічну воду	298,56
Загальна собівартість		4678,76

3.18 Висновки до розділу

У розділі наведено обґрунтування розробленого технологічного процесу виготовлення деталі. В рамках цього Проведено розрахунок кількості устаткування та показників його використання для ділянки цеху. Виконано розрахунок технологічної собівартості виготовлення деталі “Стіяка ЖВМ 22.122.19”.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Заходи, щодо створення оптимальних метеорологічних умов на робочих місцях

Для забезпечення здорових і безпечних умов праці, працездатності людини оточуюче її на виробництві повітряне середовище повинно відповідати встановленим санітарно-гігієнічним нормам [14]. На робочих місцях повинні бути створені метеорологічні умови, вимоги до них регламентуються санітарними нормами, що встановлюють оптимальні та допустимі показники мікроклімату для робочої зони закритих виробничих приміщень із урахуванням тяжкості виконуваної роботи і періодів року.

Оптимальними мікрокліматичними умовами вважаються такі, поєднання яких при тривалій і систематичній дії на людину зберігають її нормальний тепловий стан без напруження механізму терморегуляції. При цьому забезпечується відчуття теплового комфорту та створюються передумови для високої працездатності. Допустимі умови на відміну від оптимальних можуть викликати зміни теплового стану організму, що швидко нормалізуються, однак це вимагає напруження механізму терморегуляції, хоча воно не виходить за межу фізіологічних можливостей.

В основу нормування покладені умови, при яких організм людини зберігає нормальний тепловий баланс, тобто за рахунок фізіологічних процесів (прилив крові до шкіряного покриву, потовиділення) здійснюється терморегуляція, що забезпечує збереження постійної температури тіла шляхом теплового обміну зі зовнішнім середовищем.

Показниками, що характеризують оптимальні та допустимі метеорологічні умови в закритих виробничих приміщеннях, є температура, відносна вологість, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового випромінювання, а також температура поверхонь, які обмежують робочу зону. 72

З метою запобігання впливу шкідливих речовин (газ, пар, пил) на людину застосовується система заходів колективного та індивідуального захисту. Ці заходи можна поділити на технологічні, технічні, індивідуальний захист, медико-профілактичні, контрольні, а для забезпечення норм мікроклімату та захисту від несприятливих метеорологічних умов використовують систему, що охоплює інженерно-будівельні та індивідуальні заходи.

Основною задачею технологічних заходів є попередження виділення шкідливих речовин у виробничі приміщення. До них відносяться: зміна технології з метою заміни речовин, які використовуються, на менш шкідливі, застосування замкнених і безвідходних технологій.

Серед технічних заходів основне місце займає герметизація, що сприяє скороченню або ліквідації шкідливих виділень у приміщення; вентиляція, що є засобом захисту працюючих від несприятливої дії шкідливих речовин, які проникли в приміщення; місцеві відсмоктування, що запобігають проникненню шкідливих речовин у приміщення, шляхом відсмоктування їх фільтровентиляційними або вентиляційними агрегатами безпосередньо від місць виділення шкідливих компонентів; дистанційне керування, що передбачає виконання операції без участі працівника.

Вентиляція поділяється на загальнообмінну та місцеву [16]. Загальнообмінна вентиляція може бути природна, штучна та змішана. Штучна вентиляція (витяжна, притічна та притічно-витяжна) здійснюється за допомогою вентиляторів. Змішана вентиляція забезпечується шляхом подачі повітря механічними засобами та витягування забрудненого повітря природним способом.

4.2 Розрахунок загальнообмінної вентиляції

Основним призначенням загальнообмінної вентиляції є розрідження вмісту шкідливих речовин у загальній атмосфері приміщення до гранично допустимої концентрації [14-16].

При нормальному мікрокліматі, відсутності шкідливих речовин враховують

об'єм приміщення, що припадає на одного працюючого V' , та кількість повітря на одного працюючого L' , а також кількість працюючих n .

Кількість повітря ($\text{м}^3/\text{год}$), яка необхідна для нормального повітрообміну

$$L = L' n . \quad (4.1)$$

Якщо $V' < 20 \text{ м}^3$, $L' = 30 \text{ м}^3/\text{год}$.

Якщо $V' > 20 \text{ м}^3$, $L' = 20 \text{ м}^3/\text{год}$.

При загальнообмінній вентиляції для видалення шкідливих речовин розрахунок необхідного повітрообміну проводять за формулою

$$L = \frac{G \cdot \psi}{(q_{\text{здк}} - q_{\text{прит}}) \cdot 10^{-6}}, \text{ м}^3/\text{год} \quad (4.3)$$

де G – кількість шкідливих речовин, що надходить у повітря робочої зони, $\text{кг}/\text{год}$; $q_{\text{здк}}$ – концентрація шкідливих речовин в повітрі, що видаляється приймається рівною гранично допустимій концентрації, $\text{мг}/\text{м}^3$;

$q_{\text{прит}}$ – концентрація шкідливих речовин в повітрі, що надходить; зазвичай приймають

$q_{\text{прит}} = 0,3q_{\text{здк}}$;

ψ – коефіцієнт нерівномірності розподілу; $\psi = 1,2 \dots 2,0$.

Для приміщень з надлишковою вологою необхідний повітрообмін

$$L_{\text{вол}} = \frac{G_{\text{вол}}}{(K_{\text{в}} - K_{\text{пр}}) \cdot 10^{-3}}, \text{ м}^3/\text{год} \quad (4.3)$$

де $G_{\text{вол}}$ – надлишкова волога в приміщенні $\text{кг}/\text{год}$;

$K_{\text{в}}$ – кількість вологи, що міститься в повітрі, що видаляється $\text{г}/\text{м}^3$; $K_{\text{пр}}$ – кількість вологи в повітрі, що надходить $\text{г}/\text{м}^3$.

При загально обмінній вентиляції для видалення з приміщення надлишків теплоти розрахунки проводять за формулою

$$L = \frac{Q}{C_p \rho (t_{\text{в}} - t_{\text{пр}})}, \text{ м}^3/\text{год} \quad (4.4)$$

де Q – надлишкова теплота, що надходить в приміщення, $\text{Дж}/\text{год}$;

ρ – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$;

C_p – теплоємність повітря при постійному тиску, Дж/(кг·°С);

$t_в$ – температура повітря, що видаляється з приміщення, °С;

t_{np} – температура повітря, що надходить. Приймають $t_в = t_{np} + (5...8)^\circ\text{С}$.

Визначимо необхідну кількість повітря, яку необхідно подати в цех для видалення надлишкової теплоти при умові, що температура повітря за межами цеху 15°С , густина повітря, $\rho = 1,293 \text{ кг/м}^3$, а теплоємність повітря при постійному тиску $C_p = 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{С)}$. Розрахунки проводимо за формулою (4.4).

Надлишкова теплота, що надходить у виробниче приміщення визначається за формулою

$$Q = Q_{обл} + Q_{осв} + Q_{люд}, \quad (4.5)$$

де $Q_{обл}$ – теплота, що виділяється працюючим устаткуванням, Дж/год;

$Q_{осв}$ – теплота, що виділяється освітлювальною системою, Дж/год;

$Q_{люд}$ – теплота, що виділяється обслуговуючим персоналом, Дж/год.

$$Q_{обл} = Q_{ви}, \quad (4.6)$$

де $Q_{ви}$ – теплота, що виділяється кожним працюючим верстатом, Дж/год.

Теплота, що виділяється працюючим металорізальним верстатом визначається за формулою

$$Q_в = 3,6 \cdot 10^6 \cdot N \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4, \quad (4.7)$$

де N – потужність двигуна приводу головного руху, кВт;

η_1 – коефіцієнт використання потужності верстата $\eta_1 = 0,7...0,9$;

η_2 – коефіцієнт завантаження верстата $\eta_2 = 0,5...0,8$;

η_3 – коефіцієнт одночасної роботи верстатів $\eta_3 = 0,6...0,9$;

η_4 – коефіцієнт, що враховує частину потужності електродвигуна, яка перетворюється в тепло $\eta_4 = 0,5...0,6$.

Теплота, що виділяється освітлювальною системою визначається за формулою

$$Q_{осв} = 3,6 \cdot 10^6 \cdot N_{осв} \cdot k \quad (4.8)$$

де $N_{осв}$ – потужність освітлювальної системи, кВт;

k – коефіцієнт, що враховує частину потужності ламп, яка перетворюється в тепло
 $k \approx 0,95$.

Теплота, що виділяється обслуговуючим персоналом визначається за формулою

$$Q_{люд} = 3,6 \cdot 10^3 \cdot n \cdot q, \quad (4.9)$$

де n – кількість працюючих, чол;

q – кількість тепла, що виділяє одна людина, яка виконує відповідну роботу, Вт.

Визначимо теплоту, що виділяє працююче устаткування за формулою 4.7.

$$\sum Q_s = 3,6 \cdot 10^6 \cdot 125,7 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,5 = 101,4 \cdot 10^6 \text{ Дж/год};$$

Теплота, що виділяється освітлювальною системою за формулою 4.8.

$$Q_{осв} = 3,6 \cdot 10^6 \cdot 4,5 \cdot 0,95 = 15,3 \cdot 10^6 \text{ Дж/год};$$

Теплота, що виділяється обслуговуючим персоналом за формулою 4.9.

$$Q_{люд} = 3,6 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 215 = 38,7 \cdot 10^6 \text{ Дж/год};$$

Надлишкова теплота, що надходить у виробниче приміщення за формулою 4.5.

$$Q = 101,4 \cdot 10^6 + 15,3 \cdot 10^6 + 38,7 \cdot 10^6 = 155,4 \cdot 10^6 \text{ Дж/год};$$

Для видалення з приміщення цеху надлишків теплоти необхідний повітрообмін визначаємо за формулою 4.4.

$$L = \frac{155,4 \cdot 10^6}{1000 \cdot 1,293 \cdot (20 - 15)} = 24037 \text{ м}^3/\text{год}.$$

4.3 Проведення робіт на машинобудівному підприємстві в умовах надзвичайних ситуаціях воєнного часу

Сутність рятувальних та інших невідкладних робіт — це усунення безпосередньої загрози життю та здоров'ю людей, відновлення життєзабезпечення населення, запобігання або значне зменшення матеріальних збитків. Рятувальні та інші невідкладні роботи включають також усунення пошкоджень, які заважають проведенню рятувальних робіт, створення умов для наступного проведення відновлювальних робіт.

Рятувальні й інші невідкладні роботи у надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу, є однією з найголовніших задач цивільної оборони. Мета проведення рятувальних робіт – порятунок людей і надання медичної допомоги постраждалим, ліквідація аварій.

До рятувальних робіт відносяться:

- розвідка маршруту руху сил, визначення обсягу та ступеня руйнувань, розмірів зон зараження, швидкості і напрямку розповсюдження зараженої хмари чи пожежі;
- локалізація та гасіння пожеж на маршруті руху сил та ділянках робіт;
- визначення об'єктів і населених пунктів, яким безпосередньо загрожує небезпека;
- визначення потрібного угруповання сил і засобів запобігання і локалізації небезпеки;
- пошук уражених та звільнення їх з-під завалів, пошкоджених та палаючих будинків, із загазованих та задимлених приміщень;
- розкриття завалених захисних споруд та рятування з них людей;
- надання потерпілим першої допомоги та евакуація їх (при необхідності) у лікувальні заклади;
- вивіз або вивід населення із небезпечних місць у безпечні райони;
- організація комендантської служби, охорона матеріальних цінностей і громадського порядку;

- відновлення життєздатності населених пунктів і об'єктів;
- пошук, розпізнавання і поховання загиблих;
- санітарна обробка уражених;
- соціально-психологічна реабілітація населення.

До невідкладних робіт відносяться:

- прокладання колонних шляхів та улаштування проїздів (проходів) у завалах та на зараженій території;
- локалізація аварій на водопровідних, енергетичних, газових і технологічних мережах;
- ремонт та тимчасове відновлення роботи комунально-енергетичних систем і мереж зв'язку для забезпечення рятувальних робіт;
- зміцнення або руйнування конструкцій, які загрожують обвалом і безпечному веденню робіт;

Рятувальні та інші невідкладні роботи здійснюються у три етапи. На першому етапі вирішуються завдання:

- щодо екстреного захисту населення;
- з запобігання розвитку чи зменшення впливу наслідків;
- з підготовки до виконання рятувальних робіт.

Основними заходами щодо екстреного захисту населення є:

- оповіщення про небезпеку;
- використання засобів захисту;
- додержання режимів поведінки;
- евакуація з небезпечних у безпечні райони;
- здійснення санітарно-гігієнічної, протиепідемічної профілактики і надання медичної допомоги;
- локалізація аварій;
- зупинка чи зміна технологічного процесу виробництва;
- попередження (запобігання) і гасіння пожеж,

На другому етапі проводяться:

- пошук потерпілих;
- витягання потерпілих з-під завалів, з палаючих будинків, пошкоджених транспортних засобів;
- евакуація людей із зони лиха, аварії, осередку ураження;
- надання медичної допомоги;
- санітарна обробка людей;
- знезараження одягу, майна, техніки, території;
- проведення інших невідкладних робіт, що сприяють і забезпечують здійснення рятувальних робіт.

На третьому етапі вирішуються завдання щодо забезпечення життєдіяльності населення у районах, які потерпіли від наслідків надзвичайних ситуацій:

- відновлення чи будівництво житла;
- відновлення енерго-, тепло-, водо-, газопостачання, ліній зв'язку;
- організація медичного обслуговування;
- забезпечення продовольством і предметами першої необхідності;
- знезараження харчів, води, фуражу, техніки, майна, території;
- соціально-психологічна реабілітація;
- відшкодування збитків;
- знезараження майна, території, техніки.

4.4 Висновки до розділу

У розділі описані заходи, щодо створення оптимальних метеорологічних умов на робочих місцях, наведено розрахунок загальнообмінної вентиляції, окреслені порядок проведення робіт на машинобудівному підприємстві в умовах надзвичайних ситуаціях воєнного часу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено обґрунтування актуальності використання програмних продуктів для генеративного дизайну для оптимізації процесів в машинобудуванні. Проведено аналіз сучасних тенденцій щодо популярності застосування цього підходу в промисловості. Крім того, запропоновано методичку вибору раціонального програмного продукту для генеративного дизайну для навчального процесу та здійснення проектної оптимізації.

2. Показано, що програмний продукт Solid Edge 2019 доцільно використовувати при оптимізації конструкції деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19» та реалізації технології її виготовлення способом 3D друкування.

3. Викладені матеріали опубліковані в тезах [6, 7, 9] науково-технічної конференції “Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні”, яка відбулася нещодавно в м. Одеса 6-7 грудня 2023 р.

4. У роботі розроблено технологічний процес виготовлення деталі «Стійка ЖВМ 22.122.19», який базується на використанні верстатів з ЧПК із наявного на підприємстві парку технологічного устаткування. Усі прийняті проектні рішення обґрунтовано проведеними розрахунками відповідно до дрібносерійного типу виробництва. У роботі також обґрунтовано доцільність використання пристрою для закріплення деталі на фрезерному верстаті з ЧПК. Розроблена програма для обробки заготовки на такому верстаті. Проведено розрахунок технологічної собівартості виготовлення стійки.

5. У роботі також проаналізовано мікроклімат виробничого приміщення, структуровано основні шкідливі виробничі фактори на виробництві деталі та відповідні заходи щодо їх усунення. Також дано характеристику стихійних лих, аварій (катастроф) та їх наслідків для довкілля.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Creating a 3D model. Study guides for lab classes № 4 in the “CAM and CAE Systems of Machine Building Production“ course. Editors: Vasylykiv V., Danylchenko L., Radyk D. – Ternopil: Ternopil National Ivan Puluj Technical University, 2021. – 40 p.

2. Creating a parametric drawing in the automatic parameterization mode. Study guides for lab classes № 3 in the “CAM and CAE Systems of Machine Building Production“ course. Editors: Vasylykiv V., Danylchenko L., Radyk D. – Ternopil: Ternopil National Ivan Puluj Technical University, 2021. – 28 p.

3. Creating Parametric Drawing. Study guides for lab classes № 2 in the “CAM and CAE Systems of Machine Building Production“ course. Editors: Vasylykiv V., Danylchenko L., Radyk D. – Ternopil: Ternopil National Ivan Puluj Technical University, 2021. – 38 p.

4. Sketching by Non-parametric Drawing. Study guides for lab classes № 1 in the “CAM and CAE Systems of Machine Building Production“ course. Editors: Vasylykiv V., Danylchenko L., Radyk D. – Ternopil: Ternopil National Ivan Puluj Technical University, 2021. – 28 p.

5. Vasylykiv V., Danylchenko L., Radyk D. Technological methods of workpieces manufacturing. Metal Casting: Manual / V. Vasylykiv, L. Danylchenko, D. Radyk. Edited by L. Dzhydzhora. – Ternopil: Osadtsa U.V., 2021. – 203 p.

6. Vasylykiv V., Kornev O., Pynchuk V., Ryskalchuk S., Paraschuk V., Hrytsyna A. Analysis of the dynamics of patent flows concerning the advancement of generative design technologies. Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. С. 41-43.

7. Vasylykiv V., Makovynskyi N., Pynchuk P., Ryskalchuk S., Kornev O. Monitoring the use of software products for generative design. Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. С. 43-45.

8. Vasylykiv V., Pylypets M., Danylchenko L., Radyk D. (2021) Use of computer-integrated technologies in training of engineering specialists. In: Ternopil National Ivan Puluj Technical University, Proceedings of

the International Conference Advanced Applied Energy and Information Technologies, Ternopil, December 15-17, 2021, pp. 74-80.

9. Vasylykiv V., Ryskalchuk S., Makovynskyi N., Panchuk V. The use of the analytic hierarchy process method for selecting software products to implement generative design technologies for products in mechanical engineering. Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. С. 45-47.

10. Vasylykiv V.V. Technologies of workpieces manufacturing by casting: manual / V.V. Vasylykiv, L.M. Danylchenko, D.L. Radyk. – Ternopil : Published TNTU named after Ivan Puluj, 2023. – 492 p.

11. Боженко Л. І. Технологія виробництва заготовок у машинобудуванні. Київ: НМК ВО, 1990. 264 с.

12. Дичковський М. Г. Технологічна оснастка. Проектно-конструкторські розрахунки пристосувань: навч. посіб. Тернопіль: ТДТУ, 2001. 277 с.

13. Експериментальні дослідження в технології машинобудування. Навчальний посібник з дисципліни "Наукові дослідження і теорія експерименту". Уклад. Васильків В.В., Радик Д.Л. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ імені Івана Пулюя, 2012. – 386 с.

14. Жидецький В.Ц. Практикум із охорони праці: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 349 с.

15. Жидецький В.Ц., Джигирей В. Ц., Мельников О. В. Основи охорони праці : навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 350 с.

16. Запорожець О. І. Основи охорони праці: Підручник / О. І. Запорожець, О. С. Протоєрейський, Г. М. Франчук, І. М. Боровик. Київ : Центр учбової літератури, 2009. 264 с

17. Інженерний аналіз в Ansys Workbench. Методичний практикум з дисципліни "Комп'ютерне моделювання процесів обробки матеріалів". Укладачі: Васильків В.В., Радик Д.Л., Данильченко Л.М., Дивдик О.В. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 66 с.

18. Методичні вказівки для практичного заняття №1 на тему: Методи визначення ефективності інженерних рішень з дисципліни "Ефективність інженерних рішень" / Укладачі: Василь Васильків, Лариса Данильченко, Дмитро

Радик, Ігор Ярема. — Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. — 25 с.

19. Методичні вказівки для практичного заняття №2 на тему: Оцінка ефективності та обґрунтування методу отримання заготовок з дисципліни “Ефективність інженерних рішень” / Укладачі: Василь Васильків, Лариса Данильченко, Дмитро Радик, Ліліана Джиджора. — Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. — 29 с.

20. Обробка результатів експериментальних досліджень математичними методами. Методичний посібник / Уклад. Васильків В.В., Радик Д.Л., Романовський Р.М. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 74 с.

21. Паливода Ю. Є., Кухарський О. М. Визначення припусків розрахунково-аналітичним методом, Тернопіль, 2003. 81 с.

22. Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. Інструментальні матеріали, режими різання і технічне нормування механічної обробки: навчальний посібник. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. 240 с.

23. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів: навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с.

24. Терміни та визначення в технічній творчості та наукових дослідженнях. Методичний посібник / Уклад. Пилипець М.І, Васильків В.В., Радик Д.Л. – Тернопіль: Вид.-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2011. – 256 с.

25. Шоботов В. М. Цивільна оборона: Навч. посіб. Київ : Центр навчальної літератури, 2006. 438 с.

26. Міренський І. Г. Основи технології машинобудування : навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2007. 275 с. : веб сайт. URL: http://eprints.kname.edu.ua/3223/1/%D0%93%D0%9B%D0%90%D0%92%D0%90_1.doc (дата звернення: 04.10.2021).