УДК 004.89:004.4, 004.89:004.3, 621.039, 621.662/.666, 658.58
УКПП
№ держреєстрації 0121U112684
Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет (СумДУ)
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2; тел. (0542) 33 41 08

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи,
д-р фіз.-мат. наук, проф.

_____ А. М. Чорноус

« ___ » _____ 202_ р.

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗВІТ
про виконання завдань Перспективного плану розвитку
наукового напряму «Технічні науки» Сумського державного університету

(проміжний)

1 Створення систем прийняття рішень під час технологічної підготовки виробництва для виготовлення деталей шляхом механічного оброблення

2 Розроблення ефективних методів діагностування технічного стану енергетичних машин та забезпечення вібраційної надійності роторних систем

3 Створення ефективних засобів машинного навчання автономної бортової системи безпілотного літального апарата для розпізнавання наземних об’єктів

Керівники НДР: д-р тех. наук, проф. І. В. Павленко
канд. тех. наук, доц. О. В. Івченко

2022

Рукопис закінчено ___ грудня 2022 р.

Результати роботи розглянуто науковою радою СумДУ, протокол
від ___ грудня 2022 р. № ___

СПИСОК АВТОРІВ

Керівники НДР:		
Старш. наук. співроб., канд. тех. наук	_____ 29.12.2022	О. В. Івченко (вступ, висновки, рекомендації, підрозділи 1.1, 1.3, 2.2)
Головн. наук. співроб., д-р тех. наук	_____ 29.12.2022	І. В. Павленко (розділ 2)
Відповідальні виконавці:		
Старш. наук. співроб., д-р тех. наук	_____ 29.12.2022	А. С. Довбиш (розділ 3)
Головн. наук. співроб., д-р тех. наук	_____ 29.12.2022	В. О. Іванов (розділ 1)
Мол. наук. співроб., канд. тех. наук	_____ 29.12.2022	Д. О. Жигилій (підрозділ 2.1)
Виконавці:		
Мол. наук. співроб., канд. тех. наук	_____ 29.12.2022	Т. П. Говорун (підрозділ 1.1, 1.3)
Мол. наук. співроб., канд. тех. наук	_____ 29.12.2022	Ю. О. Денисенко (підрозділ 1.3)
Мол. наук. співроб., канд. тех. наук	_____ 29.12.2022	А. В. Євтухов (підрозділ 1.2)
Мол. наук. співроб., канд. тех. наук	_____ 29.12.2022	П. В. Кушніров (підрозділ 1.2)
Мол. наук. співроб.	_____ 29.12.2022	Ю. В. Симоновський (підрозділ 3.2)
Мол. наук. співроб., канд. тех. наук	_____ 29.12.2022	М. С. Скиданенко (підрозділ 2.2)
Мол. наук. співроб., канд. тех. наук	_____ 29.12.2022	Н. А. Харченко (підрозділ 1.1, 1.3)
Мол. наук. співроб., канд. тех. наук	_____ 29.12.2022	С. О. Шарапов (підрозділ 2.2)

Мол. наук. співроб., канд. тех. наук	_____ 29.12.2022	В. В. Шендрик (підрозділ 1.3)
Мол. наук. співроб., канд. тех. наук	_____ 29.12.2022	А. С. Ященко (підрозділ 2.2)
Виконавець за договором цивільно-правового характеру	_____ 20.12.2022	М. М. Амелін (підрозділ 1.1)
Виконавець за договором цивільно-правового характеру	_____ 20.12.2022	В. К. Андрусишин (підрозділ 1.1)
Виконавець за договором цивільно-правового характеру	_____ 20.12.2022	М. О. Бурим (підрозділ 2.2)
Виконавець за договором цивільно-правового характеру	_____ 20.12.2022	А. Є. Вербовий (підрозділ 2.1)
Виконавець за договором цивільно-правового характеру	_____ 20.12.2022	В. О. Залога (підрозділ 1.2)
Виконавець за договором цивільно-правового характеру	_____ 20.12.2022	В. О. Колос (підрозділ 1.1)
Виконавець за договором цивільно-правового характеру	_____ 20.12.2022	Д. Г. Малимоненко (підрозділ 1.3)
Виконавець за договором цивільно-правового характеру	_____ 20.12.2022	Т. Р. Савченко (підрозділ 3.4)
Виконавець за договором цивільно-правового характеру	_____ 20.12.2022	В. В. Сивоконь (підрозділ 3.1)
Виконавець за договором цивільно-правового характеру	_____ 20.12.2022	М. К. Супруненко (підрозділ 3.3)
Виконавець за договором цивільно-правового характеру	_____ 20.12.2022	В. А. Хоменко (підрозділ 2.2)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 440 с., 36 табл., 178 рис., 1 дод. на 2 арк., 556 джерел на 67 арк.

ДЕТАЛЬ, ЕНЕРГЕТИЧНЕ УСТАТКОВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНА ПІДГОТОВКА ВИРОБНИЦТВА, ВІБРАЦІЇ, ЯКІСТЬ, НАДІЙНІСТЬ, МЕХАНІЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ, ДІАГНОСТУВАННЯ, ТЕХНІЧНИЙ СТАН, ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ, СИСТЕМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, АВТОНОМНА БОРТОВА СИСТЕМА, БЕЗПІЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ

Мета роботи:

1. Підвищення якості виготовлення деталей шляхом зменшення вібрацій під час механічного оброблення за рахунок використання систем прийняття рішень під час технологічної підготовки виробництва - у рамках виконання пріоритетного тематичного напряму «Підвищення ефективності оброблення деталей на токарних верстатах шляхом керування динамікою процесу з високими частотами обертання шпинделя».
2. Підвищення вібраційної надійності енергетичних машин та довговічності їх функціональних елементів шляхом застосування ефективних методів діагностування технічного стану та прогнозування ресурсу - у рамках виконання пріоритетного тематичного напрямку «Розроблення ефективних методів і засобів діагностування технічного стану та прогнозування ресурсу роторних машин».
3. Підвищення функціональної ефективності машинного навчання автономної бортової системи безпілотного літального апарата (далі – БПЛА) для розпізнавання наземних об’єктів - у рамках виконання пріоритетного тематичного напрямку «Аналіз і синтез здатних навчатися (самонавчатися) інтелектуальних систем керування слабо формалізованими процесами».

За результатами виконання науково-дослідної роботи одержані такі наукові та науково-технічні результати:

1. Система прийняття рішень під час технологічної підготовки виробництва, зокрема, раціонального вибору матеріалу, схем базування та технологічних режимів виготовлення деталей шляхом механічного оброблення.
2. Систематизація впливу структури покриттів лезвійного інструменту на його механічні властивості.
3. Способи покращання динамічних характеристик процесу лезового оброблення ступінчатих отворів під час розточування за рахунок застосування нових конструкцій оправок.
4. Дослідження впливу конструкцій гнучких верстатних пристроїв на динамічні характеристики процесів механічного оброблення деталей складної форми.

5. Математична модель вимушених коливань роторів енергетичних машин із урахуванням нелінійної жорсткості опор, циркуляційних сил в ущільненнях, внутрішнього тертя та можливого контакту ротора зі статором.

6. Способи підвищення вібраційної надійності, діагностування технічного стану і прогнозування ресурсу та планового ремонту динамічно навантажених вузлів енергетичного обладнання.

7. Спосіб підвищення функціональної ефективності машинного навчання автономної бортової системи БПЛА для розпізнавання наземних об’єктів.

8. Навчальна матриця реалізації машинного навчання для побудови вирішальних правил під час розпізнавання наземних об’єктів.

Умови одержання звіту: відкритий доступ через сайт Сумського державного університету розділ «Наука» – «Науково-дослідні розробки» за посиланням: https://sumdu.edu.ua/uk/science/research-works.html

ЗМІСТ

С.

Вступ 9

1 Створення систем прийняття рішень під час технологічної підготовки виробництва для виготовлення деталей шляхом механічного оброблення 17

1.1 Методика раціонального вибору технологічних процесів отримання деталей 17

1.1.1 Технологічні процеси механічного оброблення 17

1.1.2 Технологічні процеси термо-механічного оброблення 37

1.1.3 Технологічні процеси складання виробів 86

1.2 Інтегрована технологія підвищення якості виготовлення деталей шляхом зменшення вібрацій при механічному обробленні 123

1.2.1 Підвищення ефективності тонкого розточування для ступінчастих отворів з великим діапазоном діаметрів 123

1.2.2 Особливості згинально-крутильних коливань консольних розточувальних штанг для тонкого розточування глибоких отворів малого діаметра 130

1.2.3 Ефективність динамічних гасників коливань для чистового розточування 140

1.2.4 Оптимізація шорсткості поверхні на основі параметрів точіння та геометрії вставки 149

1.3 Інтелектуальна система автоматизованого вибору схем базування деталей і раціонального вибору матеріалу 166

1.3.1 Вибір матеріалів у розробці продукту: виклики та інструменти управління якістю 166

1.3.2 Експериментальна SMART виробнича система в SmartTechLab 181

1.3.3 Фундаментальний підхід до аналізу динамічних характеристик верстатних пристроїв 192

1.3.4 Використання регресійного аналізу для автоматизованого вибору матеріалів у інтелектуальному виробництві 211

1.4 Висновок 232

2 Розроблення ефективних методів діагностування технічного стану енергетичних машин та забезпечення вібраційної надійності роторних систем 239

2.1 Методика обчислень вимушених коливань роторів енергетичних машин з урахуванням сил різної природи 239

2.1.1 Динаміка ротора турбокомпресора на основі скінчено-елементного аналізу та підходу ідентифікації параметрів 239

2.1.2 Динаміка та стійкість ротора відцентрового насоса CPN 600-35 для атомних електростанцій 249

2.1.3 Ідентифікація параметрів дискретно-масової математичної моделі коливань колінчастого валу 262

2.2 Методика прогнозування ресурсу вузлів енергетичного обладнання під дією динамічних навантажень 285

2.2.1 Універсальний експериментальний стенд для дослідження динаміки роторних систем 285

2.2.2 Дослідження відкритих, напіввідкритих та комбінованих контрроторних ступенів 286

2.2.3 Підвищення ефективності роботи конденсаційних установок парових турбін шляхом застосування рідинно-парових ежекторів 298

2.2.4 Перевиробництво пари у рідинно-паровому ежекторі: його вплив на ефективність робочого процесу вакуумного агрегату 312

2.3 Висновок 328

3 Машинне навчання бортової системи автономного безпілотного літального апарату з використанням 3D-макетів наземних об’єктів..... 331

3.1 Сучасний стан розроблення автономних безпілотних літальних апаратів 331

3.2 Формалізована постановка задачі інформаційного синтезу бортової системи автономного безпілотного літального апарату з використанням 3D-макетів наземних об’єктів 343

3.3 Формування вхідного інформаційного опису автономної бортової системи розпізнавання наземних об’єктів 346

3.4 Результати комп’ютерного моделювання 355

3.5 Висновок 362

Висновки 363

Рекомендації 368

Перелік джерел посилання 370

Додаток А Акт впровадження (використання) результатів науково-дослідної роботи у навчальний процес 440

ВСТУП

Підстава для виконання роботи.

Передбачене у державному бюджеті використання коштів для підтримки пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок у закладах вищої освіти, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 10 липня 2019 р. № 639, наказ Міністерства освіти і науки України від 23.05.2022 № 470-22 «Про затвердження переліку закладів вищої освіти, яким надаватимуться бюджетні кошти для підтримки пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок за результатами проведеної державної атестації, з відповідними обсягами фінансування на 2022 рік».

Проблеми, які вирішуються під час виконання роботи.

1. Розроблення принципів керування динамікою процесу оброблення поверхонь на токарних верстатах при точінні деталей діаметром до 20 мм з високими частотами обертання шпинделя є актуальною науково-технічною проблемою, розв’язання якої дозволить підвищити ефективність (продуктивність) оброблення зазначених деталей при одночасному забезпеченні вимог креслення щодо шорсткості поверхонь.

У машино-, приладо-, авіабудуванні та інших галузях за рахунок зменшення розмірів агрегатів та механізмів постійно збільшується частка деталей, які представляють собою тіла обертання з розмірами до 20 мм (корпуси вимірювальних датчиків, короткі вісі приладів і літальних апаратів, плунжери гідравлічних дозаторів і блоків живлення, наконечники струмознімачів зварювального обладнання, штифти тощо), технологія виготовлення яких вимагає токарного оброблення. Крім того, зростають вимоги до якості оброблених поверхонь цих деталей, що обумовлено необхідністю забезпечення відповідних експлуатаційних характеристик виробу, зокрема: міцності виробу при зменшенні його габаритних розмірів, зносостійкості, протистояння стомлюючим навантаженням, збільшенню контактної жорсткості, вібросталості

тощо. Необхідність забезпечення попиту ринку, який постійно змінюється, на деталі малого діаметру створює передумови для збільшення продуктивності процесу їх механічного оброблення. Підвищення продуктивності зрізання припуску при токарному обробленні деталей, поверхні яких мають діаметри до 20 мм, у зв'язку з їхньою відносно малою жорсткістю можливе, як правило, за рахунок підвищення швидкості різання [1, 2].

Технологія оброблення деталей із різних конструкційних матеріалів з відносно високими швидкостями різання при токарному обробленні може забезпечити необхідну якість відповідно до конструкторсько-технологічних вимог і у багатьох випадках виключити необхідність додаткового фінішного оброблення. Це стало можливим із розвитком інструментальних матеріалів для лезового оброблення, наприклад, твердих сплавів, у т. ч. зі зносостійкими покриттями, які дозволяють виконувати механічне оброблення деталей із чорних металів (сталей, сплавів, чавунів тощо) зі швидкостями різання понад 500 м/хв, а із кольорових (алюмінієвих, мідних тощо) металів і сплавів зі швидкостями понад 1000 м/хв. Таким чином, можна стверджувати, що потенційними резервами підвищення продуктивності при точінні є здатність сучасних інструментальних матеріалів різати з високою швидкістю, а для деталей, які мають малі розміри (діаметри до 20 мм), з відносно високими частотами обертання шпинделів – не менше 6000 об/хв. [1, 2]

Аналіз показує, що для збільшення швидкості оброблення деталей малих діаметрів за рахунок підвищення частоти обертання шпинделя з метою отримання необхідної (заданої кресленням) точності й шорсткості оброблених поверхонь необхідно забезпечувати синхронність працездатності ріжучого інструменту з відповідним динамічним станом металообробного обладнання. При цьому вплив коливань обладнання на процес різання повинен бути мінімальним, а динамічні характеристики виконавчих органів повинні забезпечувати точну і синхронну роботу усієї обробної системи. [1, 2]

Сьогодні виробляється досить велика кількість сучасних металообробних верстатів і оброблювальних центрів, у яких максимальні частоти обертання шпинделів знаходяться, як правило, в межах до 5000–6000 об/хв. Разом з тим,

при їхньому практичному використанні одним із важливих питань є забезпечення сталого динамічного стану відповідних елементів верстатного обладнання, таких як: шпиндельні вузли, супортні системи, допоміжні пристрої тощо. [1, 2]

Збільшення частот обертання шпинделів при обробленні деталей, які мають поверхні діаметром до 20 мм, для приведення швидкості різання до значень, рекомендованих виробниками інструментів (наприклад, твердосплавних при обробленні сталей – 250–300 м/хв), може призводити до втрати динамічної сталості відповідних елементів обробної системи та погіршення відповідних показників якості. Це пов’язано з тим, що при високій частоті обертання шпинделя значно збільшується дисбаланс системи «шпиндель – пристрій – заготовка», у результаті чого досить часто сила дисбалансу може значно перевищувати силу різання та, відповідно, суттєво впливати на динамічний стан всієї обробної системи. [1, 2]

У той же час, світ успішно впроваджує результати четвертої промислової революції «Індустрія 4.0», що пов’язана з провадженням «Інтернету речей» (Internet of Things – IoT), яка має на меті застосування обчислювальних мереж фізичних об’єктів, які взаємодіють з унікальними або віртуальними ідентифікаторами і дозволяють здійснювати обмін даними між усіма компонентами системи виробництва, а також із зовнішнім середовищем.

Тому пропонується створення сучасного науково-методологічного підходу щодо створення «розумних» виробництв засобами цифрового двійників та віртуальної імітаційної моделі виробництва. Основною технологією виготовлення типових виробів в машинобудуванні є лезове обробленням матеріалів. Зокрема, чистове оброблення металевих деталей визначає геометричні розміри, форму і якість обробленої поверхні (поверхневого шару). Ураховуючи ту обставину, що одними з основних особливостей чистового оброблення є досить малі глибини різання (0,1–0,4 мм) та подачі і, відповідно, малі товщини зрізів та відносно великі швидкості різання, до лез різальних інструментів висуваються особливі вимоги щодо гостроти різальних кромок та дійсного у процесі різання значення коефіцієнту тертя. Зокрема, радіус

округлення різальної кромки повинен бути достатньо малим, тобто не виходити за встановлені межі, та коефіцієнт тертя на робочих поверхнях різального леза, особливо його адгезійна складова, яка суттєво залежить від умов контактування леза зі стружкою та поверхнями на заготовці, тобто від умов різання, при цьому процес не повинен супроводжуватись суттєвим підвищенням температури різання, а відтак і суттєвим зростанням швидкості зношування леза.

Дослідження рекомендацій відомих виробників лезових різальних інструментів щодо вибору режимів оброблення встановило наявність спеціальних програмних комплексів для розрахунку або довідкових даних (каталогів). У той же час, ці довідкові матеріли надають досить великий діапазон даних щодо призначення режимів різання під час застосування конкретного інструменту.

Відтак, створення методології застосування віртуалізації процесів оброблення металів лезвійним різальним інструментом дозволить ще на один крок наблизити впровадження IoT, як ключової ланки забезпечення швидкого введення в обіг нової нехарчової продукції від ідеї до споживача.

2. Забезпечення вібраційної надійності роторних машин та підвищення енергоефективності відповідного енергетичного обладнання (турбін, компресорів, турбонаддувів, відцентрових насосів тощо) є екзистенційною проблемою забезпечення енергонезалежності України за умов інтенсифікації виробничих процесів на електростанціях шляхом збільшення робочих швидкостей і вихідного напору насосно-компресорного устаткування.

Актуальність цієї науково-практичної проблеми підкреслюється тим, що за даними Міжнародного енергетичного агентства та Всесвітньої ядерної асоціації біля 50 % середньорічного виробництва електроенергії в країнах Європейського Союзу забезпечують атомні електростанції та гідроелектростанції, основним енергетичним устаткуванням на яких є роторні машини. За даними Reuters, проблема забезпечення енергоефективності стає більш значущою через вторгнення Росії в Україну, оскільки країни Європейського Союзу підтримують заборону імпорту російських енергоносіїв, незважаючи на наслідки.

Вирішення поставленої проблеми вимагає розв’язання різноманітних наукових задач динаміки, міцності та стійкості елементів енергетичного устаткування. Останні підходи до вивчення робочих процесів у роторних системах, забезпечення їх енергоефективності та вібраційної надійності переважно ґрунтуються на традиційному моделюванні за допомогою потужного програмного комплексу ANSYS Workbench та подальшому аналізі одержаних результатів за допомогою MatLAB. Проте, аналітичні залежності для такого моделювання (жорсткісні характеристики підшипникових опор, коефіцієнти демпфування та циркуляційної сили в ущільненнях, моделі внутрішнього тертя тощо) базуються на спрощених математичних моделях.

Тому пропонується приділити головну увагу розробленню достовірних нелінійних математичних моделей динаміки зв’язаної механічної системи «ротор – шпаринні ущільнення – підшипникові опори». Подальше дослідження цих моделей реалізовуватиметься із використанням сучасного науково-методологічного підходу, заснованого на комплексному застосуванні аналітичних методів дослідження, засобів чисельного моделювання, а також інтелектуальних систем прийняття рішень та штучних нейронних мереж.

Такий підхід дозволить визначити нелінійні складові сил в підшипникових опорах і шпаринних ущільненнях та оцінити вплив робочих параметрів роторних машин і гідродинамічних характеристик робочої рідини на вібраційну надійність та енергоефективність енергетичного устаткування.

3. Удосконалення систем автономної навігації на основі створення бортової системи, здатної розпізнавати системні і зовнішні трафіки, є важливою проблемою у сфері забезпечення обороноздатності України в умовах сучасних загроз.

Тому пропонується створення системи автономної навігації безпілотника за географічними орієнтирами без виходу в глобальну мережу GPS. Ця система за результатами інформаційно-екстремального машинного навчання буде здатна розпізнавати системні і зовнішні трафіки з метою виявлення кібератак і несанкціонованих вторгнень.

Такий підхід дозволяє на відміну від штучних нейронних мереж забезпечити адаптивність системи до довільних умов формування зображень, практичну інваріантність системи до багатовимірності словника ознак розпізнавання і гнучкість при перенавчанні системи через розширення алфавіту класів розпізнавання.

На цей час існує науково-практична проблема щодо забезпечення кіберзахищеної бортової системи безпілотного авіаційного комплексу для розпізнавання наземних природних, інфраструктурних об’єктів і транспортних засобів, яка прямо корелюється з безпекою життя та здоров’я громадян та захисту інфраструктури та значущих об’єктів економіки.

Для проведення експериментальних досліджень в лабораторних умовах на основі симулятора (випробувальний стенд кіберзахищеної бортової системи безпілотного авіаційного комплексу для розпізнавання наземних природних, інфраструктурних об’єктів і транспортних засобів) використовуватиметься симулятор, здатний відтворювати рельєф заданого регіону і наземні об’єкти розпізнавання, 3D-зображення яких оптичним каналом передаються на відеокарту бортової системи розпізнавання для формування навчальної матриці і реалізації машинного навчання з метою побудови вирішальних правил.

Мета роботи.

1. Підвищення якості виготовлення деталей шляхом зменшення вібрацій під час механічного оброблення за рахунок використання систем прийняття рішень під час технологічної підготовки виробництва - у рамках виконання пріоритетного тематичного напряму «Підвищення ефективності оброблення деталей на токарних верстатах шляхом керування динамікою процесу з високими частотами обертання шпинделя».

2. Підвищення вібраційної надійності енергетичних машин та довговічності їх функціональних елементів шляхом застосування ефективних методів діагностування технічного стану та прогнозування ресурсу - у рамках виконання пріоритетного тематичного напрямку «Розроблення ефективних методів і засобів діагностування технічного стану та прогнозування ресурсу роторних машин».

3. Підвищення функціональної ефективності машинного навчання автономної бортової системи безпілотного літального апарата (далі – БПЛА) для розпізнавання наземних об’єктів - у рамках виконання пріоритетного тематичного напрямку «Аналіз і синтез здатних навчатися (самонавчатися) інтелектуальних систем керування слабо формалізованими процесами».

Для досягнення поставленої мети в роботі були встановлені та вирішенні наступні **завдання**:

– встановити залежність впливу концентрації лігатури Ti-Zr на твердість силуміну АК5М2;

– розробити спосіб підвищення надійності твердосплавного різального інструменту на основі обробки інструментального твердого сплаву імпульсами магнітного поля;

– запропонувати спосіб отримання зміцненого поверхневого шару легованих сталей на основі застосування методу азотування в контейнері з використанням нанокристалічного порошку;

– встановити можливість титаноалітування сталі У8А з попередньо нанесеними покриттями методами хіміко-термічної обробки;

– розробити комплексну автоматизовану методику відбору матеріалів, в основі якої закладено використання регресійного аналізу та ймовірнісного підходу;

– дослідити можливість тонкого розточування ступінчастих отворів з великою різницею діаметрів кроків унікальними розточувальними стрижнями, що забезпечують однакову рекомендовану швидкість різання;

– розробити динамічну модель, яка б описувала зв’язані згинально-крутильні коливання для розрахунку амплітуд коливань розточувальної штанги;

– запропонувати математичну модель статичної розрахункової системи «пристрій – заготовка», яка б забезпечувала є визначення точок контакту функціональних елементів кріплення із заготовкою, мінімально необхідного зусилля затиску, складових сил різання та місць прикладання цих сил;

– розробити математичну модель динамічного аналізу, яка б описувала систему рівнянь відносно 6 змінних за незалежними від часу параметрами;

– теоретично довести гіпотезу щодо можливості досягнення точнісних параметрів механічного оброблення у виробничому процесі із неповним базуванням;

– теоретично обґрунтувати отримання необхідних показників точності оброблення згідно з кресленням за рахунок можливості закріплення нерознімних шатунів способом часткового базування;

– запропонувати новий підхід до проектування структури складальної операції, що дозволить розумно перерозподілити технологічні переходи між оператором і роботами;

– провести дослідження щодо уточнення математичної моделі динаміки ротора з використанням кінцевих балкових елементів;

– на основі критеріїв Рауса–Гурвіца оцінити динамічну стійкість прецесії ротора модернізовано відцентровий насос ЦНА 600-35 для водопостачання промислового контуру атомних електростанцій з точки зору робочої частоти та коефіцієнта тертя, а також побудувати відповідну область стійкості;

– розробити параметричну ідентифікацію дискретних мас для переходу від скінченноелементної моделі вільних коливань колінчастого вала до дискретно-масової; отриману модель розширити на випадок вимушених коливань шляхом додавання сил інерції залишкових дисбалансів, нелінійного демпфування та гідродинамічної жорсткості, нелінійних сил тертя та циркуляції, а також сил контактної взаємодії ротор-статор у перехідних режимах;

– практична реалізація нового підходу до ідентифікації кадрів у рамках обраної технології за рахунок введення додаткового статистичного квантора перевірки класифікацій, який дозволяє підвищити релевантність вирішальних правил;

– розробити навчальну матрицю реалізації машинного навчання для побудови вирішальних правил під час розпізнавання наземних об’єктів.

1 СТВОРЕННЯ СИСТЕМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПІД ЧАС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ШЛЯХОМ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ

1.1 Методика раціонального вибору технологічних процесів отримання деталей

1.1.1 Технологічні процеси механічного оброблення

1.1.1.1 Технологічний супровід виготовлення кронштейнів

Алюмінієві сплави широко застосовуються завдяки їх цінності для техніки, складності механічних, фізичних і корозійних властивостей [3]. Вітчизняний та зарубіжний досвід металургії алюмінієвих сплавів [4, 5] показує, що в умовах сучасної ринкової економіки отримання високоякісних сплавів за мінімальних витрат на його виробництво є вирішальним.

Основними факторами, що визначають технічний рівень, є матеріали та конструкції, які можуть полегшити автомобіль, зменшити витрату палива, підвищити економічну віддачу та екологічну безпеку [6]. Серед асортименту конструкційних матеріалів вони посідають друге місце після сплавів на основі заліза, оскільки мають малу щільність, високу міцність і стійкість до корозії.

Розробка ефективних технологій виробництва алюмінієвих сплавів, модифікованих дисперсними сплавами, є завданням сучасних металургійних і ливарних технологій [7], а також енергетики [8, 9] і загального машинобудування [10, 11]. При цьому основним напрямком пошуку нових сплавів є універсальність їх складу та можливість отримання високих експлуатаційних властивостей в умовах використання різних технологій лиття та безпосередньо в литому чи термічно обробленому стані [12].

Поліпшення механічних властивостей виливків з алюмінієвих сплавів є важливим теоретичним і практичним завданням для професіоналів ливарного виробництва. Відповідно до тенденцій розвитку алюмінієвої переробки останніх років виробництво вторинних алюмінієвих сплавів із відходів і брухту становить

майже половину загального обсягу [13]. Це зумовило мету та актуальність даної роботи, а саме дослідження мікроструктури та механічних властивостей вторинно модифікованого силуміну лігатурою Ti-Zr.

Для підвищення якості промислової продукції використовуються різні методи: від покриттів [14, 15], кольорових сплавів [16, 17] і високоентропійних сплавів [18] до композиційних матеріалів [19, 20].

Комплексна обробка покращує механічні та технологічні властивості вторинних алюмінієвих сплавів, включаючи процеси рафінування [21] та модифікації [22]. Модифікування та лігатури застосовують при виготовленні та лиття алюмінієвих сплавів, введених у шихту або безпосередньо в розплав [23]. Моделі поверхонь деталей машин реалізовано в [24, 25]. Вплив параметрів обробки та покриття на робочі поверхні спряжених деталей досліджено в [26, 27].

Кузьмін М. та ін. [28] показали перспективність отримання сплавів Al-Si шляхом додавання аморфного кремнезему в потоці аргону в розплав алюмінію при високих температурах. Представлено практичний спосіб отримання евтектичних і заевтектичних сплавів Al-Si шляхом індукційного плавлення суміші, що містить кремнезем. Підвищує ефективність існуючого технологічного процесу отримання силуміну за рахунок часткового виключення енергоємної стадії виробництва металургійного кремнію.

Гілєв І. та ін. [29] запропонували невеликі добавки Ti та Zr для стримування процесів рекристалізації сплавів Al–Cu. Після деформації та термічної обробки вони досліджували вплив добавок Ti та Zr на макроструктуру та механічні властивості сплаву Al–4%Cu.

Черепанов А. та ін. [30] запропоновали класифікувати модифікатори на дві принципово різні групи. До першої групи належать позитивні добавки в малих концентраціях до 1% мас., такі елементи як Ti, Zr, B, Sb. До другої групи належать натрій, калій та їх солі.

Романченко та ін. [31] запропоновано підхід до дослідження твердості покриттів. Мамзуріна О. та ін. [32] досліджували вплив Zr на фазу, хімічний склад і механічні властивості сплавів на основі алюмінію. Добавки Zr

підвищують твердість вихідних сплавів за рахунок осадження складних фаз у процесі гомогенізації.

У нашій попередній роботі [33] ми проаналізували вплив лігатури Ti-Al на підвищення властивостей силуміну АК5М2. Показано, що використання бездефіцитної та дешевої лігатури Al-Ti5 у поєднанні з термічною обробкою дозволяє значно підвищити властивості литих виробів з алюмінієвих сплавів. Тому ми продовжили дослідження впливу лігатур інших складів, зокрема Ti-Zr, на мікроструктуру та механічні властивості силуміну АК5М2.

В цій роботі в якості матриці використовувався алюмінієвий сплав марки АК5М2. Сплав виплавлено в умовах промислового виробництва. Його хімічний склад визначено методом спектрального аналізу з використанням еталонних зразків, контрольні проби – методом хімічного аналізу (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сплаву АК5М2 (мас. %)

Хімічний склад основних елементів, мас. %						Домішки ≤ мас. %	
Al	Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Fe	Zn
основа	4,0-6,0	1,5-3,5	0,2-0,8	0,2-0,8	0,05-0,2	1,3	1,5

Вміст заліза в сплаві відповідає його концентрації в найбільш поширених промислових силумінах (ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93)), що виробляються з брухту та відходів кольорових металів (ДСТУ 3211-95). Основні показники матеріалу наступні: межа короткочасної міцності − 118-206 МПа; відносне подовження − 0,5-2 %; твердість за Бринеллем − 65-75 МПа (згідно ДСТУ 2839 (ГОСТ 1583)).

Модифікування здійснювали введенням лігатури Ti-Zr (табл. 3) в залежності від концентраційної кількості останньої (0,025; 0,05; 0,075; 0,1 %).

Таблиця 1.2 – Хімічний склад лігатури Ti-Zr, мас. %

Елемент	Zr	Fe	Si	V	Ti
Вміст	45	0,5	0,25	0,45	Решта

Лігатуру Ti-Zr використовують для збільшення температури рекристалізації деяких алюмінієвих сплавів. Присутність цирконію в алюмінієвих сплавах перешкоджає росту зерна при підвищених температурах, покращує зварюваність, перешкоджає росту зерна в зонах поруч зі звареним швом, зменшує сприйнятливість до корозії під напругою, зменшує чутливість до швидкості охолодження при гартуванні.

Плавлення матеріалу здійснювали в електричній печі опору під шаром соляного флюсу. Вищезазначені добавки вводили в розплав при температурі 720-740 °С за допомогою ливарного дзвоника. Ретельно перемішували розплав для забезпечення однорідності і повного засвоєння легуючих елементів. Силумін після модифікування витримували в печі при температурі 720 °С протягом 10 хв., після чого його розливали в кокіль діаметром 50 мм.

Далі проводили термічну обробку, графік якої наведено на рис. 1.1.

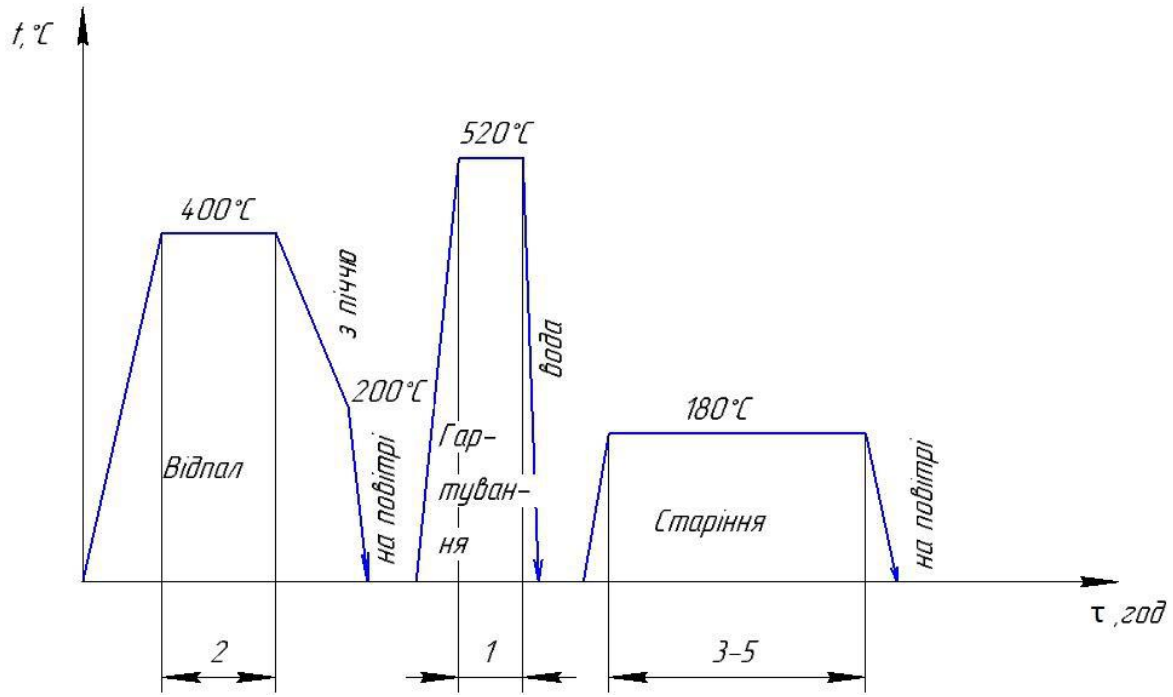


Рисунок 1.1 – Графік термічної обробки дослідних матеріалів

Одержані циліндричні заготовки обточували, готували мікрошліфи, а потім проводили механічні випробування та дослідження мікроструктури.

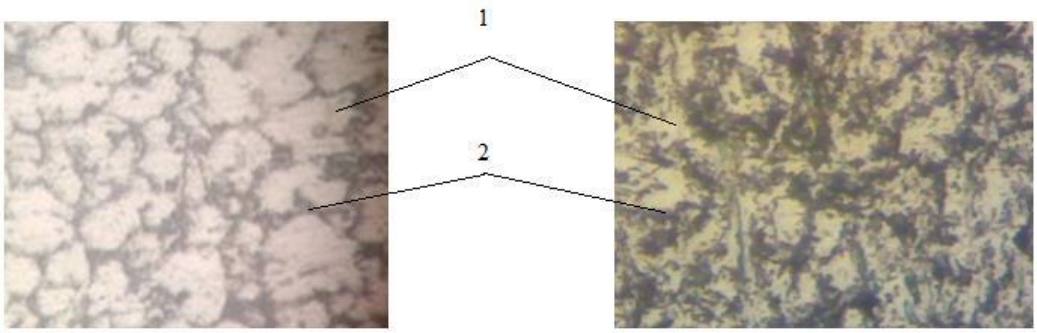
Дослідження поводили на вторинному силуміні АК5М2 у вихідному та модифікованому стані; в литому та термообробленому стані, який

використовується для виготовлення середньонавантажених деталей в автомобілебудуванні.

Методика дослідження властивостей дослідних зразків включала визначення міцності при розриві, ударної в’язкості та твердості, як основних даних про матеріал для конструкторів, технологів і експлуатаційників.

Вивчення мікроструктури дослідних матеріалів проводили за допомогою металографічного мікроскопу МИМ-7 на протравлених зразках реактивом Келлера, що має склад HCl – 1,5 мл; HF – 1 мл; HNO_3 – 2,5 мл; H_2O – 95 мл при збільшенні у 200 разів, а також методом металографії з високою роздільною здатністю на растровому електронному мікроскоп «Tescan-VEGA 3». Міцність і пластичність сплавів визначали на зразках діаметром 10 мм і робочою довжиною 50 мм, виготовлених відповідно до ДСТУ 2839. Планування та обробку експериментальних даних здійснювали методами математичного планування експерименту і математичної статистики.

Мікроструктура вихідного доевтектичного силуміну АК5М2 складається з твердого розчину кремнію в алюмінії та евтектики, в якій кремній знаходиться у вигляді грубих голчастих і пластинчастих включень, що істотно знижують міцність і пластичність сплавів (рис. 1.2).



а) б)

Рисунок 1.2 – Структура доевтектичного вторинного сплаву АК5М2:
а) – вихідний стан, б) – термооброблений стан, х200;
1 − α-твердий розчин Si в Al; 2 − евтектика (Mg2Si, AlCu3 (β))

У зв’язку з цим модифікування таких сплавів направлено на подрібнення евтектичного кремнію. В сплаві АК5М2 після введення модифікуючих частинок відбувається перерозподіл структурних складових і диспергування евтектичного кремнію (рис. 1.3). Голки евтектичного кремнію дробляться і набувають більш компактну округлу форму, зменшуються розміри дендритів α-твердого розчину алюмінію, що добре узгоджується з даними [3].

Виявлено, що легування сплаву до 0,05 % Ti-Zr не впливає на розмір макрозерна, а при його збільшенні до 0,1 % зерно подрібнюється вдвічі (рис. 1.3). Додаткове легування Ti-Zr підсилює ефект модифікування литої структури силуміну. При сумарній концентрації Ti і Zr з'являються надлишкові алюмініди складного складу Al_3(Zr, Ti). Виявлено, що дані лігатури позитивно впливають на розміри дендритних осередків і евтектичного кремнію, а в структурі виливків, незважаючи на підвищений сумарний вміст Ti і Zr (0,1 %), відсутні надлишкові алюмініди.

Так як в сплаві присутні і титан, і цирконій, у яких температура плавлення більша, ніж температура плавлення алюмінію, вони стають центрами кристалізації, навколо яких утворюються зерна α-твердого розчину кремнію в алюмінії.

При вмісті 0,025 % Ti-Zr бал зерна до ТО був 3-4, після ТО − 4-5, при 0,05% до ТО − 4-5, після ТО став 5-6, при 0,075% до ТО − 4-5 бал, після ТО − 5-6, при 0,1% до ТО − 5-6 бал, після ТО − 6-7, відповідно.

Залежності впливу кількості модифікатора на властивості і параметр форми включень в литому стані і після термічної обробки за пропонованим режимом (рис. 1.2) наведено на рис. 1.4.

В результаті проведених досліджень встановлені залежності концентрації лігатури Ti-Zr на твердість та міцність при розриві силуміну в литому стані і після термічної обробки (рис. 1.4).

Вміст Ti-Zr, мас. %

Стан сплаву

Литий | Термооброблений

0,025

0,05

0,075

0,1

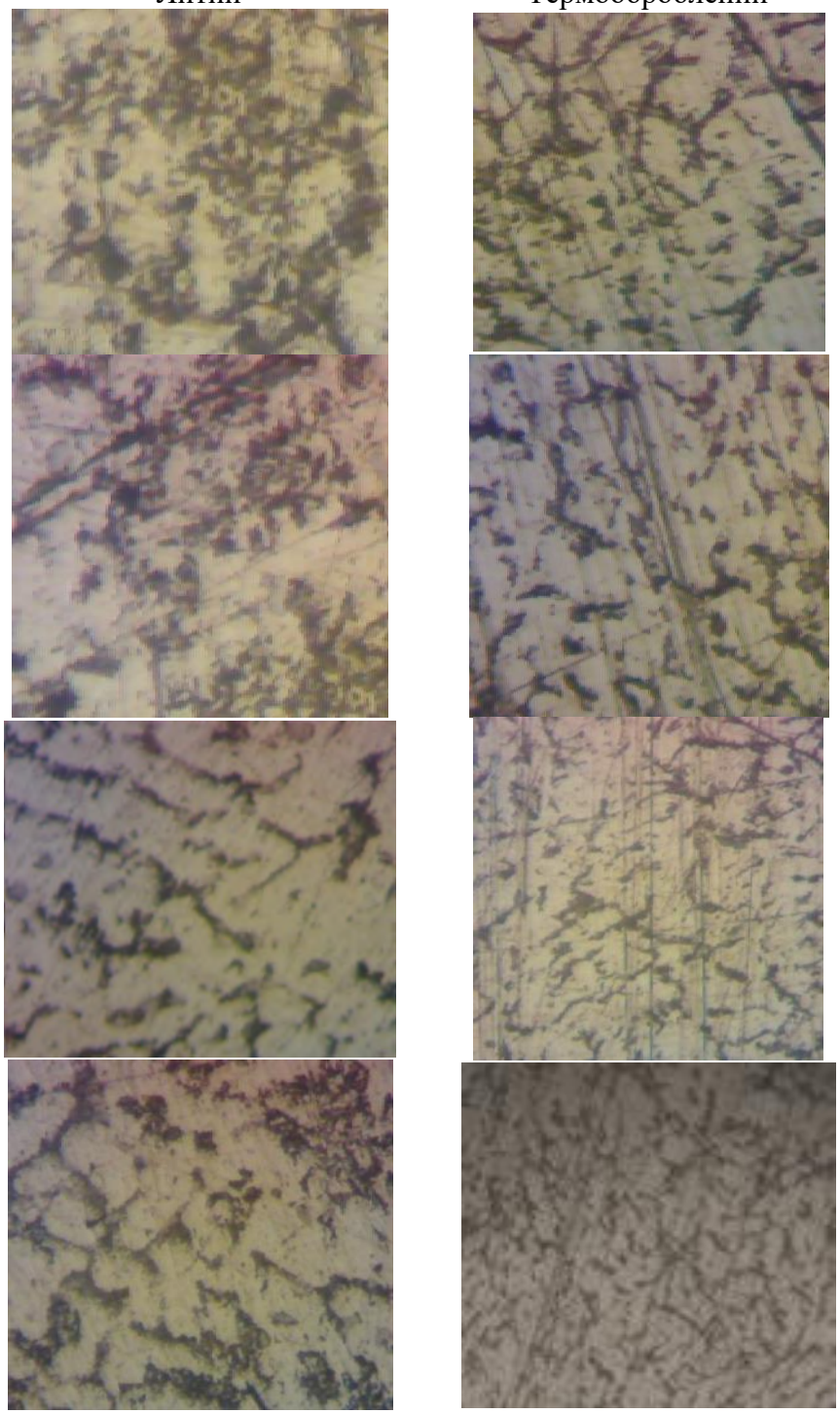
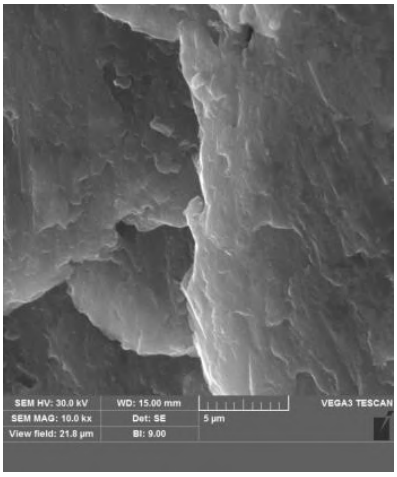
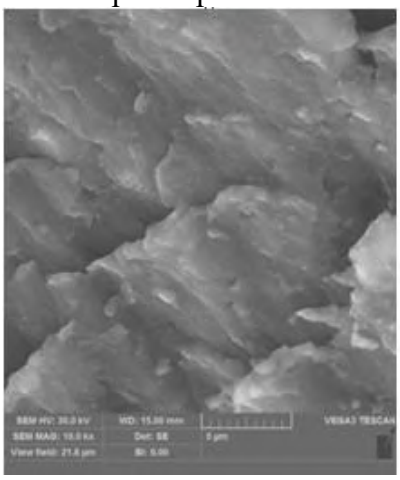


Рисунок 1.3 – Структура алюмінієвого сплаву АК5М2 + Ti-Zr, х200

Стан сплаву

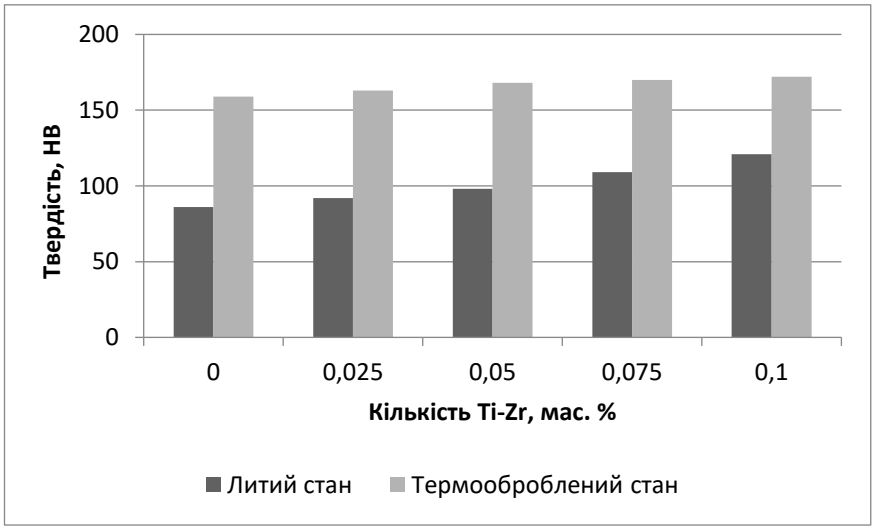
Литий | Термооброблений



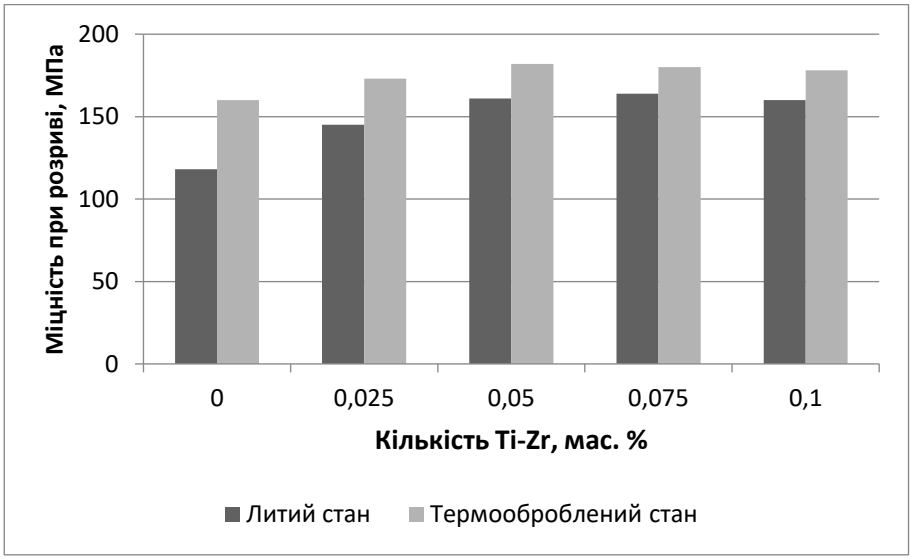


в) г)

Кінець рис.1.3: в), г) − АК5М2+ Ti-Zr l (0,10 %).



а)



б)

Рисунок 1.4 – Вплив лігатури Ti-Zr на твердість (а) та міцність при розриві (б) доевтектичного сплаву АК5М2 в литому стані та після термообробки.

Проаналізувавши отримані результати можна відмітити наступне. Була виявлена лінійна залежність впливу концентрації лігатури на твердість силуміну: зростання концентрації лігатури веде до збільшення твердості силуміну як в литому, так і термообробленому стані. Проведена термічна обробка досліджених зразків сприяє підвищенню показників твердості в 1,4-1,8 рази і міцності при розриві в 1,3-1,5 рази. Ведення лігатури 0,1 мас. % Ti-Zr підвищує твердість силуміну в 1,4 та 1,1 рази в литому і термообробленому стані відповідно. Максимальне значення міцності при розриві спостерігається при введенні лігатури Ti-Zr 0,05 мас. %.

На підставі отриманих результатів встановлено, що введення модифікуючих добавок у вторинні алюмінієві сплави сприяє підвищенню фізико-технічних і експлуатаційних властивостей сплавів. При цьому твердість досліджених сплавів підвищується на 20-30 %, міцність - на 15-25 %, що добре узгоджується з результатами роботи [21].

1.1.2 Перспективи розробки та чисельного моделювання гнучких кріплень: приклад обробки шатунів

На цей час в умовах активного розвитку концепції Індустрії 4.0 перед виробниками запасних частин до автомобілів та іншої техніки стоїть досить складне завдання, а саме забезпечення швидкого виготовлення продукції різної номенклатури у мінімальні терміни дискретними партіями. При цьому якість готової деталі/виробу повинна відповідати, як вимогам, що задані конструктором на кресленні, так і міжнародним стандартам якості [34]. У зв’язку із вищесказаним підприємствам для можливості виготовлення конкурентоздатної продукції необхідно постійно оновлювати не тільки обладнання, технології виготовлення, а й підходи до виробничого процесу [35]. Номенклатура автомобілів та іншої техніки, що містить двигуни внутрішнього згоряння – трактори, мотоцикли, катери, дрібна сільськогосподарська та інша техніка, постійно зростає. При цьому час виходу продукції на ринок скорочується, оновлюються моделі, змінюються технічні характеристики. [36]

У сучасних умовах змінився підхід до виготовлення запасних частин до вищевказаної техніки. По-перше, виробники намагаються зробити свої вироби більш легкими та ефективними. Це стосується не лише масивних корпусних деталей (наприклад, блоки циліндрів ДВС) [37], а й інших відповідальних деталей двигуна намагаються оптимізувати за масою. В останні 10 років в автомобілебудуванні активного розвитку набули технології виготовлення високонавантажених деталей із композиційних матеріалів [38], проте є деякі обмеження в їх застосуванні, що пов’язані із їх фізико-механічними властивостями. Наприклад деталі циліндро-поршневої групи на даний час не можуть бути виготовлені з композиційних матеріалів, адже композити не здатні сприймати високі температури без руйнування, зміни форми та ін. По-друге, на підприємствах із виготовлення запасних частин велику увагу приділяють інтенсифікації виробництва [39, 40], що має на меті зменшення часу виготовлення готової деталі/виробу та скорочення собівартості. При цьому підприємства готові витрачати кошти на придбання прогресивних металорізальних верстатів та іншого обладнання, що дозволяє зменшити частку ручної праці робітника до мінімуму або ж повністю її виключити. Це вимагає запровадження нових технічних рішень для зміни технологічного процесу (ТП) у бік концентрації механічних операцій оброблення деталі. У зв’язку зі збільшенням технологічних можливостей сучасних металорізальних верстатів, а саме із появою функцій автоматичного визначення положення та розмірів заготовки, а також автоматичного перерахунку координат опорних точок контуру заготовки у системі координат верстата актуальним завданням є проектування прогресивних конструкцій гнучких верстатних пристроїв (ВП). Дані ВП мають бути максимально жорсткими, для використання технологічних можливостей сучасних верстатів та різальних інструментів. Також ВП повинні мати мінімальну кількість деталей та масу, при цьому дозволяючи встановлювати деталі у максимально можливому діапазоні розмірів згідно з конструктивними характеристиками. [36]

Спеціальні ВП, що реалізують установлення заготовки наданням їй однозначного положення досягнутого при базуванні характеризуються досить

великими габаритними розмірами, а також суттєвими витратами допоміжного часу на установлення заготовок у них, тому для вирішення вищевказаних завдань не підходять. Спеціальні ВП також не раціонально застосовувати в умовах багатономенклатурного виробництва. [36]

Класичний підхід проектування ВП, до появи сучасних верстатів з функцією автоматичного визначення координат, передбачав необхідність позбавлення такої кількості ступенів вільності, яка необхідна для повної орієнтації оброблюваних поверхонь усіх деталей із партії у одне і теж положення відносно вибраної системи координат верстата із заданою точністю, що і є повним базуванням.

Метою даної роботи є теоретичне доведення гіпотези досягнення необхідної точності оброблення та підходу до проектування ВП на основі чисельного моделювання розробленої конструкції гнучкого ВП для оброблення нерознімних шатунів із неповним базуванням для умов багатономенклатурного виробництва.

Шатун є основним елементом будь-якого кривошипно-шатунного механізму та використовуються у всіх класичних компонуваннях двигунів внутрішнього згоряння. Шатун представляє собою зв’язуючу деталь між поршнем, що рухається поступально, та колінчастим валом, що здійснює обертальний рух. Сучасні двигуни внутрішнього згоряння мають суттєво більшу потужність, ніж двигуни аналогічного робочого об’єму, виготовлені 20–30 років тому. В основному, підвищення потужності досягається шляхом підвищення частоти обертання колінчастого вала двигуна, наявністю нагнітача повітря у вигляді турбокомпресора чи турбіни та збільшення ступеня стиснення. Всі ці підвищені навантаження, що надходять з камери згоряння через рух поршня за допомогою шатуна передаються на колінчастий вал. [36]

При цьому автовиробники намагаються зробити свої вироби максимально легкими та міцними. Це все призводить до необхідності виконання точних розрахунків шатунів за допомогою методів чисельного моделювання. Авторами статті [41] було виконано топологічну оптимізацію конструкції шатуна в програмному комплексі Autodesk Fusion 360, враховуючи виконані розрахунки

за допомогою методу скінченно-елементного аналізу у програмному комплексі ANSYS. J. Xiao та інші у дослідженні [42] методом чисельного моделювання визначили оптимальну товщину меншої головки шатуна для забезпечення достатньої жорсткості при посадці втулки та оптимальну величину натягу у з'єднанні.

Y. Basavaraj та інші у роботі [43] визначили, що оптимальним матеріалом для шатунів, що піддаються високим циклічним навантаженням є вуглецева сталь легована хромом і молібденом.

Оптимізація маси шатунів великогабаритних дизельних двигунів внутрішнього згоряння є актуальним завданням. У роботі [44] за допомогою програмного забезпечення CATIA було виконано параметричну оптимізацію конструкції і розмірів шатуна, що дозволило зменшити його масу, а отримана модель перевірена на міцність у програмному комплексі ABAQUS. Дослідження [45], присвячені структурній та топологічній оптимізації конструкції шатуна за рахунок зниження маси на 20–60 % під час постійного статичного навантаження, що прикладалось у програмному комплексі ANSYS.

Аналіз підтвердив, що неправильні розрахунки призводять до аварійних ситуацій під час виходу з ладу саме шатунів. Основні похибки при проектуванні та методи їх уникнення наведені у роботах [46, 47]. Авторами статті [48] доведено, що маркування шатунів при штампуванні має бути чітко визначеної форми і розмірів, а також знаходитись у певних місцях, щоб не порушити міцність деталі в цілому.

Враховуючи вищевказане та важливість зменшення собівартості продукції, автори [49] виконали аналіз часу виготовлення шатуна на кожній з операцій технологічного процесу та запропонували шляхи інтенсифікації виробництва шляхом об'єднання деяких операцій. X. Liu та інші [50] також займалися дослідженням виробничого процесу виготовлення шатунів та запропонували новий метод оцінювання проектування технологічного процесу, котрий реагує на стан оброблення у реальному часі на основі технології цифрового двійника.

В умовах масового виробництва для зменшення часу оброблення шатуни часто виготовляють у багатомісних спеціальних ВП [51]. Проте, в умовах одиничного і дрібносерійного виробництв, а також для машин спортивного і спеціального призначення шатуни можуть виготовляти не з поковки, а з суцільного листа металу у ВП типу машинних лещат, універсально-збірних ВП [52].

Удосконаленням технологічних процесів оброблення деталей типу шатунів займаються багато вчених. Зокрема у роботі [53] досліджено технологічний процес оброблення рознімного шатуна. При цьому у якості ВП на операції оброблення отворів під гвинти було запропоновано спеціальну розтискну оправку. Робота [54] присвячена розробленню та дослідженню верстатного пристрою для операції чистового розточування отворів у шатуні. S. K. Malave та ін. у [55] запропонували та виготовили ВП з гідравлічним зажимом для операції розточування втулки у малій головці шатуна.

Таким чином, виходячи з літературного огляду публікацій у галузі проектування, моделювання, інтенсифікації технологічних процесів виготовлення шатунів та розроблення верстатних пристроїв для їх оброблення, обраний напрямок дослідження, а саме розроблення та чисельне моделювання ВП для оброблення не рознімних шатунів за один установ є актуальним. [36]

Об’єктом дослідження обрано деталі типу шатунів. Шатуни мають досить різноманітну конструкцію залежно від службового призначення виробу/машини, де працює шатун. Проте з усіх конструкцій шатунів можна виділити чотири основних: рознімні шатуни (рис. 1.5а), нерознімні шатуни (рис. 1.5б), рознімні клемові шатуни (рис. 1.5в), нерознімні клемові шатуни (рис. 1.5г).

Рознімні шатуни (рис. 1.5а) в основному використовуються в автомобільних двигунах та компресорах великої потужності. Шатуни зображені на рис. 1.5б порівняно з шатунами рис. 1.5а мають розріз у малій головці шатуна для можливості жорсткої фіксації поршневого пальця та недопущення його провороту. Ця конструкція не використовується в автомобільних двигунах з початку 60-х років минулого століття, та в даний час використовується лише на великогабаритних шатунах тихохідних корабельних двигунів. Нерознімні

шатуни (рис. 1.5в), як правило використовуються у двигунах мотоциклів, бензопил та іншої невеликої техніки мототехніки. Нерознімні клемові шатуни (рис. 1.5г) мають розріз у великій голівці шатуна та використовуються в поршневих компресорах малої та середньої потужностей. Розріз призначений для можливості надійної фіксації підшипника кочення у великій головці шатуна шляхом затяжки гвинта клемового з'єднання. [36]

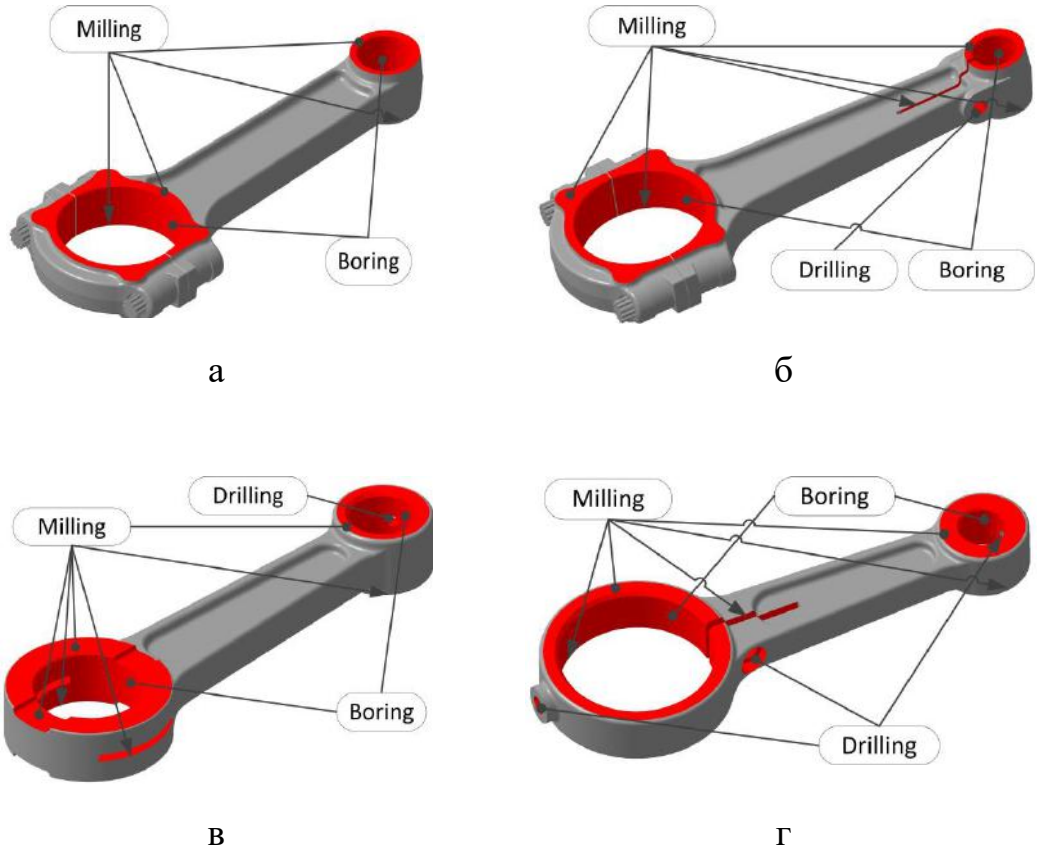


Рисунок 1.5 – Основні конструкції шатунів з оброблюваними поверхнями [36]:
а – рознімні шатуни; б – рознімні клемові шатуни;
в – нерознімні шатуни; г – нерознімні клемові шатуни

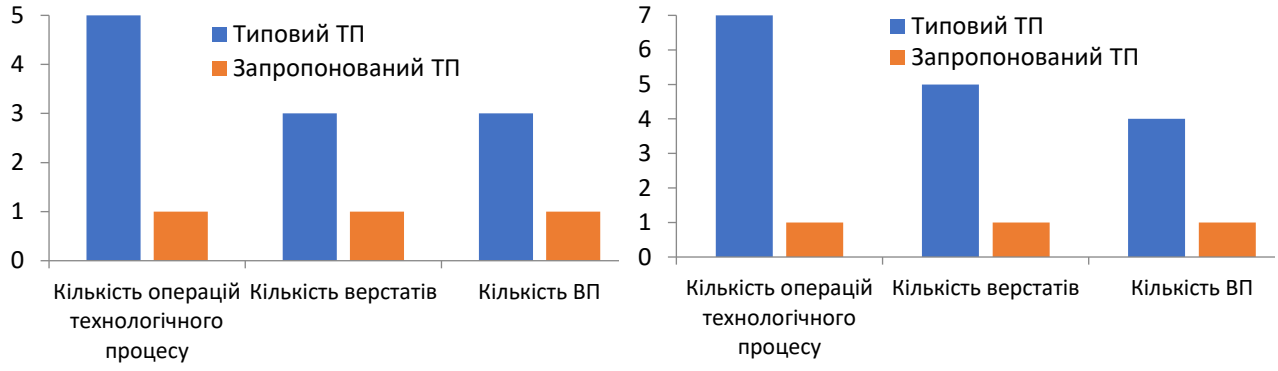
Усі отвори та площини шатунів пов'язані між собою вимогами до міжцентрових відстаней між ними, паралельності осей, та вимогами до просторового положення плоских поверхонь одна відносно іншої. Через широку розповсюдженість нерознімних шатунів у негабаритних двигунах внутрішнього згоряння (рис. 1.5в) та у побутових компресорах – нерознімних клемових шатунів (рис. 1.5г) підвищення продуктивності їх оброблення є актуальним

завданням. Нерознімні шатуни, на відміну від рознімних, являють собою одну деталь на протязі усього ТП їх виготовлення, тому їх було обрано у якості об’єкта для аналізу та подальшого розроблення конструкції ВП. Нерознімні шатуни характеризуються великою кількістю необроблюваних поверхонь та складною просторовою геометричною формою, що спричиняє певні труднощі при базуванні та закріпленні заготовок та призводить до збільшення трудомісткості оброблення через збільшення кількості технологічних операцій, тому доцільним у даній роботі вважаємо розглянути саме оброблення нерознімних шатунів. [36]

Досліджено типові ТП оброблення шатунів та встановлено, що кількість операцій, механічного оброблення для нерознімного шатуна (рис. 1.5в) складає 5 свердлильно-фрезерно-розточувальних операцій для виконання яких потрібно здійснити 10 переустановлень заготовки. Для оброблення нерознімного клемового шатуна (рис. 1.5г) ТП складає 7 свердлильно-фрезерно-розточувальних операцій, для виконання яких потрібно здійснити 11 переустановлень заготовки [56, 57]. Враховуючи технологічні можливості сучасних багатоцільових верстатів та підходів до проектування, що вже успішно використовувались під час розроблення ВП для вилок [58], запропоновано оброблення деталей типу нерознімних шатунів (рис. 1.5в) здійснювати за один установ шляхом об’єднання чотирьох свердлильно-фрезерно-розточувальних операцій типового ТП в одну – комплексну на оброблювальному центрі з ЧПК. Для деталей типу нерознімних клемових шатунів (рис. 1.5г) оброблення пропонується здійснювати за один установ шляхом об’єднання п’яти операцій типового ТП в одну – комплексну на оброблювальному центрі з ЧПК. Такий підхід дозволяє інтенсифікувати виробничий процес, що наглядно представлено на діаграмах (рис. 1.6). [36]

Зокрема, для нерознімних шатунів скоротити технологічний процес на 4 операції механічного оброблення, кількість верстатів з 3 одиниць до одного багатоцільового верстата з ЧПК, кількість спеціальних ВП з 3 одиниць до одного гнучкого ВП. Для нерознімних клемових шатунів скоротити технологічний процес на 6 операції механічного оброблення, кількість верстатів з 5 одиниць до

одного багатоцільового верстата з ЧПК, кількість спеціальних ВП з 4 одиниць до одного гнучкого ВП. [36]



a b

Рисунок 1.6 – Діаграма порівняння показників технологіного процесу для [36]: а – нерознімних шатунів; б – нерознімних клемових шатунів

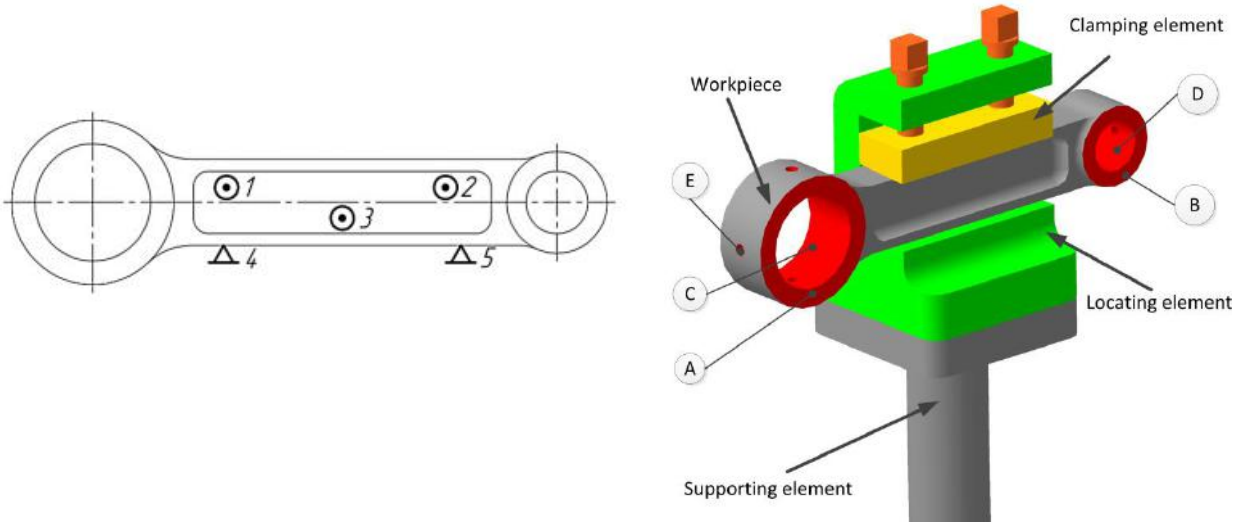
При використанні сучасного верстата з функцією автоматизованого визначення положення деталі попереднє оброблення базових поверхонь не потрібне, що дозволяє спростити конструкцію ВП та скоротити ТП на одну операцію порівняно із ТП у дослідженні [59].

Запропонований ТП оброблення усіх поверхонь нерознімного шатуна, що потребують операцій свердління, фрезерування або розточування може бути реалізований на оброблювальному центрі з ЧПК, як вертикального так і горизонтального компонування у шести позиціях. [36]

Сьогодні на світових ринках і у побуті представлене велике різноманіття моделей автомобілів, тракторів та мототехніки, поршневих компресорів та інших машин, що містять у своїй конструкції шатуни. Проте конструкції нерознімних шатунів, майже не відрізняються. Різниця може бути лише у зміні типорозміру конфігурації оброблюваних поверхонь та їх характеристик (точність, шорсткість) залежно від службового призначення машини/вузла, тому доцільним є розроблення гнучкого ВП, що дозволить встановлення нерознімних шатунів у певному діапазоні розмірів та форми. Даний ВП має забезпечити повну інструментальну доступність та дозволити виконувати багатокоординатне оброблення усіх поверхонь, що потребують оброблення, за один установ. При

цьому типорозміри та конструктивні параметри нерознімних шатунів та нерознімних клемових шатунів досить схожі і в одному ВП можна буде оброблювати декілька типів шатунів. Використання сучасних прогресивних верстатів дозволяє відійти від принципу повної орієнтації заготовки у ВП, а вимагає лише надійного закріплення, щоб забезпечити незмінність положення заготовки у процесі оброблення. [36]

У результаті розроблено гнучкий верстатний пристрій, призначений для установлення нерознімних шатунів різних типорозмірів у діапазоні довжини 140–200 мм, ширини 35–50 мм та висоти 17–24 мм, що здійснюється шляхом регулювання гвинтових механізмів, які забезпечують зміну відстані між установлювально-затискними елементами (рис. 1.7).



а б

Рисунок 1.7 – Гнучкий ВП для оброблення нерознімного шатуна з оброблюваними поверхнями на комплексній операції з ЧПК [36]: а – схема базування; б – 3D візуалізація

Даний ВП є модульним, тобто він може бути встановлений за рахунок стандартизованих установлювально-затискних елементів у базуючі модулі або трикулачковий патрон чи машинні лащата з призматичними губками. Запропонований ВП має досить просту конструкцію з мінімальною кількістю деталей та з’єднань, а отже передбачувано матиме високу жорсткість для можливості оброблення із максимально допустимими режимами різання. Таке

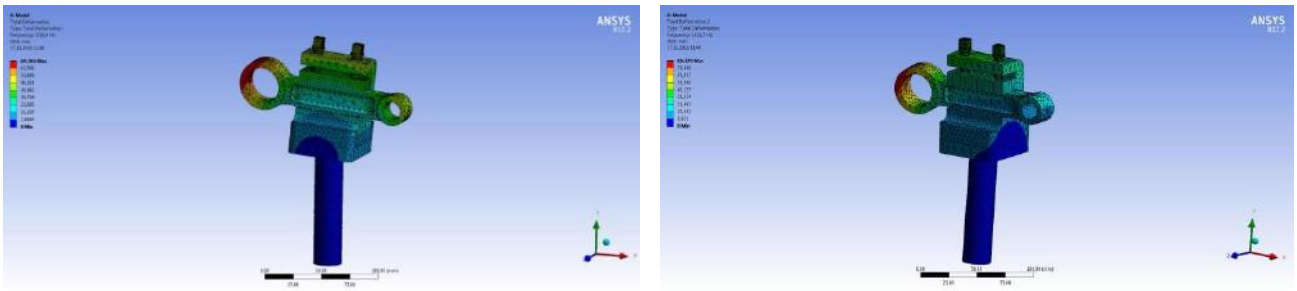
технічне рішення дозволить виконувати оброблення і на трикоординатному фрезерному верстаті із ЧПК, оснащеному лише двохкоординатним обертовим столом. Єдиною умовою є наявність системи попереднього визначення положення заготовки відносно системи координат верстата. [36]

Так як принцип дії запропонованого ВП заснований на необхідності забезпечення абсолютної надійності закріплення то для визначення можливості досягнення точності розмірів, форми та взаємного розташування поверхонь при механічному обробленні необхідно виконати напружено-деформований аналіз системи «ВП – заготовка. Визначено переміщення елементів системи «ВП – заготовка» під дією зовнішніх навантажень (сили закріплення, сили різання, а також моменти різання) у запропонованому ВП для не рознімних шатунів. Визначення міцності ВП виконувалось шляхом отримання значень еквівалентних напружень. При цьому враховано моделі контактної взаємодії між заготовкою і функціональними елементами, а також виявлено концентратори напружень. Максимальні значення еквівалентних напружень, що визначалися в ANSYS Workbench за гіпотезою Мізеса, порівнювалась із допустимим значенням для конкретного матеріалу з якого виготовлені деталі ВП, а також матеріал оброблюваної деталі.

У моделі ВП враховано кулонівське тертя між контактними поверхнями ВП, які мають приблизно однакову величину шорсткості (1,6 мкм за критерієм Ra) з коефіцієнтом 0,1. [36]

Під час механічного оброблення у технологічній системі неминуче виникають коливання певної частоти та форми. Ці частоти спричинені такими факторами як технологічні параметри режимів оброблення (глибина різання, подача, швидкість різання, діаметр оброблення, кількість інструментів). Але кожна технологічна система має також і власні частоти коливань, які залежать від конструктивних параметрів та матеріалу деталей, що складають цю систему. Часто під час механічного оброблення виникають вібрації, що спричинені резонансом технологічної системи, який виникає у разі співпадіння власної частоти технологічної системи із частотою процесу різання на конкретному переході. Тому для запобігання виникнення явища резонансу в процесі

механічного оброблення нерознімних шатунів у розробленому ВП визначені власні частоти його коливань за допомогою вбудованого модуля Modal Analysis у розрахунковому комплексі ANSYS Workbench, та виконано їх порівняння з частотами дії знакозмінних компонент сил і моментів різання на всіх переходах свердлильно-фрезерно-розточувальних операцій для досліджуваного ВП. Результати аналізу дозволяють визначати необхідне відлаштування від резонансу. При розрахунках усі елементи ВП зв’язувались між собою шляхом об’єднання вузлів. Для деяких поверхонь елементів ВП передбачено можливість відносного переміщення з коефіцієнтом тертя, типами контактів і характеристики контактних пар між поверхнями елементів. Приклад форми першої та другої власних частот коливань розробленого ВП приведено на рис. 1.8. Також з рис. 1.8 видно, що на першій частоті коливання конструкції відбуваються у площині XY, а на другій у площині YZ.



а б

Рисунок 1.8 – Приклад форм частот коливань запропонованого ВП:
а – 1-ша власна частота; б – 2-га власна частота [36]

За результатами значень власних частот коливань запропонованого ВП та порівняння із максимальною частотою процесу різання на переході свердління отвору встановлено, що для запропонованого ВП явище резонансу не виникне, так як перша критична частота значно перевищує частоту процесу різання 1729 Гц > 100 Гц. При цьому співставивши значення для ВП із повним та неповним базуванням варто відмітити, що значення частот коливань для ВП із неповним базуванням вище, що можна пояснити меншою кількістю деталей та з’єднань між ними відповідно. [36]

Для перевірки значень амплітуд коливань системи «ВП – заготовка» необхідно виконати дослідження динамічного стану розробленого ВП. Це передбачає визначення показників динамічної жорсткості на кожному з переходів механічного оброблення. У процесі задання граничних умов для моделювання амплітуди динамічних складових сил та моментів різання обирались у межах 20 % від номінального значення їх величин, тобто амплітуди сил різання на переходах оброблення поверхонь нерознімного шатуна варіювалось в межах 101–587 Н, а амплітуди крутних моментів – 9–28,4 Н•м . Попередні дослідження показали, що діапазон робочих частот процесу різання при обробленні нерознімних шатунів не перевищує 100 Гц, що дозволяє обмежитись діапазоном 0–100 Гц на графіках АЧХ при визначенні величини переміщень. Результати чисельного моделювання динаміки системи «ВП – заготовка» дозволили отримати значення амплітуд коливань, що виражались у значеннях переміщень точок у зоні оброблення, зумовлених процесом різання. Приклад АЧХ при розсвердлюванні отвору Ø29,5 мм у великій бобишці нерознімного шатуна наведено на рис. 1.9. [36]

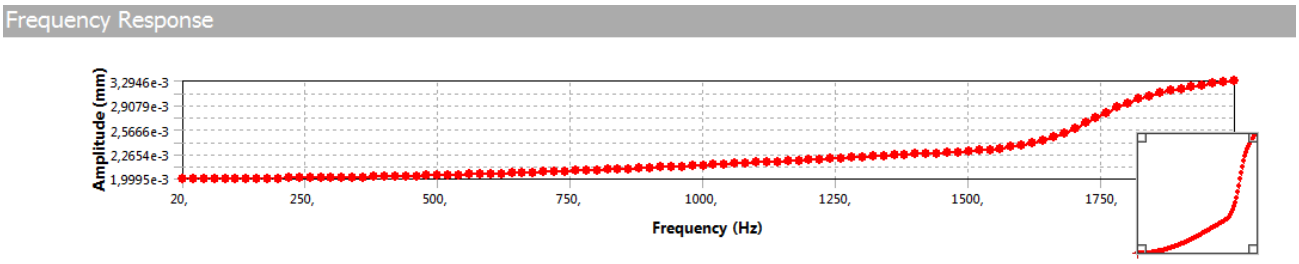


Рисунок 1.9 – АЧХ ВП з неповним базуванням при обробленні поверхні С нерознімного шатуна [36]

Амплітуди коливань, що виникають на всіх переходах механічного оброблення є меншими за величини допусків на відповідні оброблювані поверхні, отже, точність буде досягнута. Для визначення резерву запропонованого ВП розраховано динамічну жорсткість для переходу розсвердлювання отвору діаметром 29,5 мм у великій бобишці шатуна.

1.1.2 Технологічні процеси термо-механічного оброблення

1.1.2.1 Виготовлення призматичної деталі Т-207 за технологією адитивного виробництва

Технологія виготовлення будь-якої деталі полягає в правильному виборі найбільш раціональної заготовки. Обсяг її механічної обробки залежить від вибору заготовки і визначення способу її виготовлення, форми, величини припусків, допусків, точності, шорсткості, конфігурації, якості поверхні. Слід зазначити, що вибір заготовки залежить від наступних основних параметрів: матеріалу, форми деталі, її маси, розмірів, допустимих умов роботи деталі, а також від масштабів адитивного виробництва. При механічній обробці матеріал будь-якої деталі зазвичай визначається проектувальником, виходячи з основних експлуатаційних характеристик різнорідного матеріалу. Також необхідно враховувати виконання всіх вимог до точності та якості виробу, які передбачені технічними умовами національних та міжнародних стандартів. Слід також зазначити, що механічні властивості неоднорідних матеріалів (сірий чавун СЧ15) суттєво відрізняються за своїми характеристиками, що істотно впливає на кінцеві параметри деталі Т-207. Основним завданням технології виготовлення заготовок є максимальне наближення їх розмірів і форми до готових деталей. Одночасно слід також враховувати, що в процесі адитивної підготовки вже визначено матеріал деталі, який багато в чому визначає тип заготовки, конструкцію технологічних процесів, механічної обробки та технологію її виготовлення в цілому [60]. Тому дослідження машинобудівних гетерогенних матеріалів та їх подальша механічна обробка із застосуванням нових технологій адитивного виробництва є одним із основних напрямків досліджень на сьогодні. Це, у свою чергу, дозволяє забезпечити високий рівень розвитку технології машинобудування та покращити основні показники економічного та виробничого характеру.

У роботі [61] автори досліджували загальний вплив магнітного поля на фізико-хімічні властивості мастильних охолоджуючих рідин у промислових умовах. На першому етапі роботи автори намагнічували теплоносії в

стаціонарних і стандартних умовах. На другому етапі розглядалася намагніченість рідини, яка виникає в середині матеріалів. Після цього різницю між усіма отриманими результатами аналізували для побудови діаграм. В роботі [62] викладено економічні та технічні аспекти дослідження безперервного та безконтактного вимірювання діаметра заготовки. Також розглядаються певні виробничі операції з використанням відповідного датчика. Роботи [63] включають трибологічну поведінку та аналіз шорсткості поверхні, а подрібнені композити обробляють подвійною термообробкою. Проте технічні умови згідно стандартів враховані не повністю. Аналіз робіт [64] дозволяє використовувати новий запатентований підхід у виробничому процесі. Слід зазначити, що недоліком даної роботи є те, що тут описується процес виробництва лише після абразивної обробки. Матеріали охоплюють оптимізацію методу Тагучі та дослідження впливу вхідних параметрів на шорсткість поверхні [65]. Для дослідження використовувався тільки метод ранжування (DEAR), який вирішує задачі з вузьким діапазоном застосування. У роботі [66] запропоновано індивідуальний підхід до виготовлення деталей з елементами конструкції будь-якого призначення. Автори встановили, що в зоні взаємодії неоднорідних матеріалів утворюється певна товщина перехідного шару, яка практично не змінюється зі збільшенням часу витримки. Ці дослідження дозволили підвищити якісні показники деталей з конструктивними елементами, зокрема зубчастих коліс. В експериментальних роботах [67] проводяться відповідні вимірювання за допомогою одновимірного лазерного віброметра, який паралельно поєднаний із фрезерним верстатом з ЧПК. Метою цього дослідження є встановлення порівняльних характеристик ультразвукової та звичайної машини. Автори [68] запропонували вивчати переважно пакетне планування в середовищі майстерні. У той же час слід враховувати лише енергозберігаюче планування та час завершення обробки. Важливим моментом є те, що пріоритет партії продукту встановлюється відповідно до верхнього та нижнього співвідношення, яке має місце в самій структурі продукту. А також моделювання малоциклової втоми та недосконалості зовнішніх факторів, які впливають на виготовлення деталей у процесі механічної обробки [69]. У дослідницькій роботі [70] розроблено

теоретичну частину та запропоновано імовірнісну модель для розрахунку шорсткості поверхні під час магнітно-абразивної обробки. Однак використовувані матеріали мають випадкові розмірні характеристики та випадково розташовані на поверхні інструментів. Тобто заготовка має неправильний зовнішній вигляд і профіль. Колектив співавторів [71] запропонували дослідити внутрішні зв'язки програмного забезпечення між компонентами. Розрахунок окремих сегментів структурно неоднорідних матеріалів проводився з урахуванням усіх можливостей програмного продукту Smart-eye. Слід зазначити, що запропонований алгоритм розпізнавання зображень окремих ділянок мікроструктури частинок компонентів дозволяє обґрунтувати зовнішню та внутрішню властивості зразків. У наукових роботах [72, 73] композитні та наноматеріали моделювалися для адитивного виробництва. Наукові результати [74, 75] відображають оптимізацію параметрів проектування та обробки. Вимірювання шорсткості на поверхні оброблюваних деталей проводили в автономному режимі. Прогнозування результатів шорсткості ґрунтувалося на обробці вібраційних сигналів, записаних на вертикальному та горизонтальному обробному центрі з ЧПК. Теорії досліджень [76, 77] обґрунтовують вплив температури, сили, зносу інструменту та виділення дрібного пилу. Ці дослідження в основному спрямовані на застосування аналітичних та емпіричних моделей для оцінки надійності показників сили різання та теоретичного прогнозування. Було також виявлено, що швидкість шпинделя суттєво впливає на температуру різання, оскільки при вивільненні дрібних частинок питома енергія різання зростає, а інструмент зношується. У [78] шорсткість поверхні хонінгування та деяких отворів оптимізовано на основі системи GRA-RSM. Великим недоліком цих експериментів є те, що звичайне внутрішнє шліфування в основному проводило обробку поверхні, яка схильна до горіння та збільшує велику кількість тріщин. У наукових роботах [79, 80] розглянуто загальні методи оцінки стійкості технологічних процесів та експериментальної діагностики відповідних характеристик. Ми забезпечили стабільність показників якості та точності продукції за допомогою критерію Фішера та надали загальну оцінку механічної обробки в умовах цифрового

виробництва. Проте проблеми, що виникають при механічній обробці деталей при адитивному типі виробництва, висвітлені не повністю. Оскільки потрібно приділяти більше уваги механізму зносу інструменту та внутрішнім дефектам внутрішніх компонентів заготовки, які виникають під час обробки. Тому що отримання цих результатів забезпечує мінімальну шорсткість поверхні зразків, високу корозійну стійкість, високу точність і загальну механічну обробку.

Корпусні деталі типу Т-207 призначені для розміщення складальних одиниць і окремих елементів деталей. Корпус Т-207 забезпечує стабільну точність взаємного розташування деталі і механізму, як в статичному стані, так і при роботі будь-якого верстата. Тому даний тип деталі має достатню жорсткість. Слід зазначити, що частина корпусного типу має основні базові поверхні. Як правило, вони представлені у вигляді площин, за допомогою яких при необхідності з'єднуються з каркасом і рештою корпусом. На рис. 1.10 представлено креслення корпус деталі типу Т-207.

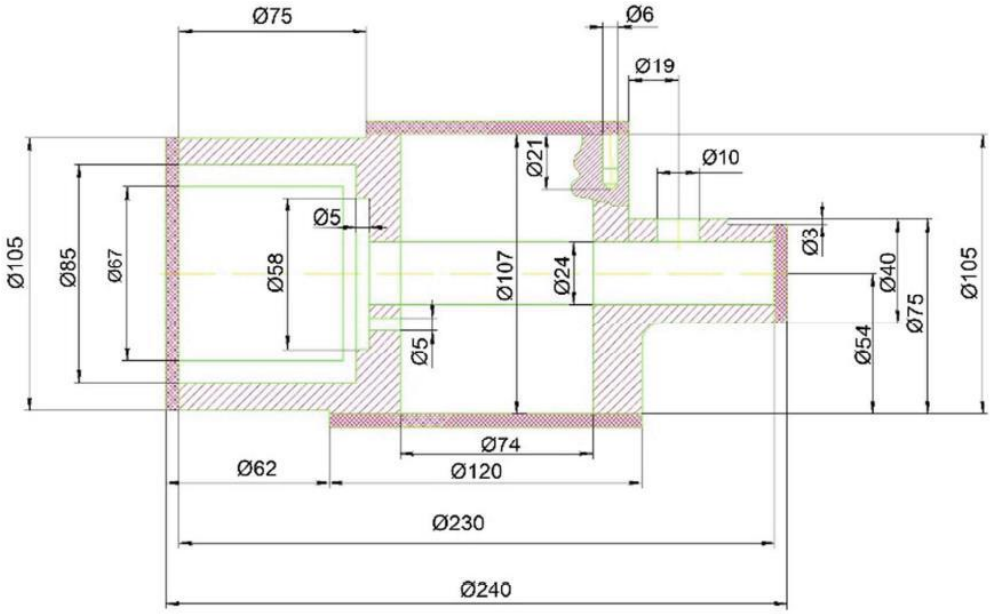


Рисунок 1.10 – Загальний вид 2d креслення корпус деталі типу Т-207

Також слід зазначити, що в даному виді деталей є допоміжні базові поверхні отворів і площин. У свою чергу, діаметри отворів були зроблені з полем допуску Н7 і R_a = 1,4–0,5 мкм. Допуск на центрування деяких отворів встановлювався в межах половини поля допуску для діаметра найменшого отвору чаші корпусу не більше 0,2–0,6 мм. При цьому були зафіксовані деякі

допустимі відхилення та міжцентрові відстані, які лежать у межах допустимих норм за стандартом.

Заготовка деталі корпусного типу Т-207 виготовлялася методом лиття в піщано-глиняні форми. Перевагою цього методу є найменша вартість лиття, а також є можливість багаторазового використання дослідних форм.

Матеріал – сірий чавун марки СЧ15. Даний матеріал СЧ15 використовується тільки в тих типах деталей, де потрібна висока міцність і стійкість до корозії, а також підвищена зносостійкість. Механічна обробка заготовки корпусу визначалася вибором основ і розмірними зв'язками, які функціонують між поверхнями деталі. У процесі виготовлення зафіксовано два способи базування:

1) по трьох площинах з утворенням координатного кута;

2) по площині з використанням двох отворів, які оброблені за точністю якості Н7 з посадкою.

З метою вдосконалення технології виготовлення та механічної обробки будь-яких деталей в умовах адитивного виробництва нами досліджено хімічний склад і механічні властивості неоднорідних матеріалів СЧ15. Отримані результати представлені в табл. 1.3 та 1.4.

Таблиця 1.3 – Хімічний склад сірого чавуну

Вуглець, %	Кремній, %	Марганець, %	Фосфор, %	Сірка, %
2,5–4,5	0,8–4,5	0,1–1,2	0,02–0,3	0,02–0,15

Використовуючи отримані результати, ми з'ясували, що завдяки правильному способу виготовлення деталі втрати матеріалу зменшуються на 10—15%. При цьому трудомісткість механічної обробки знижується в 1,5-2,0 рази за рахунок зменшених припусків і високої точності розмірів.

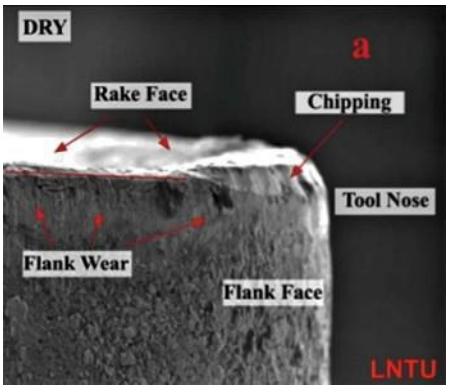
Особливої уваги потребує цілісність поверхні покриття із сірого чавуну марки СЧ15, оскільки це має знизити вартість кінцевого продукту використання. Слід зазначити, що цілісність поверхні вже обробленого виробу залежить від

зносу інструментів, параметрів обробки та стану охолодження. Під час цього дослідження ми виявили деякі обмеження через знос інструменту.

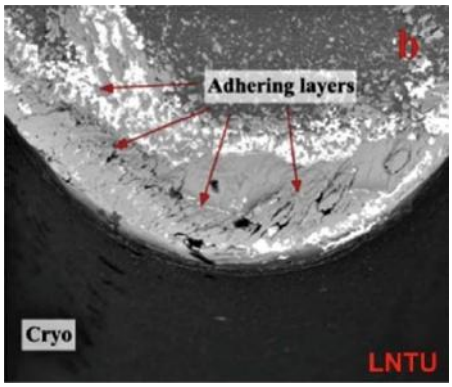
Таблиця 1.4 – Механічні властивості СЧ15

Межа міцності, МПа	Пружність, МПа	Твердість за Брінеллем, НВ
100–350	450–1400	143–289

При швидкому зносі інструменту шорсткість поверхні значно зменшилася. Також зафіксували, що під час точіння необхідно обробляти поверхню на менших швидкостях подачі. Після зниження швидкості різання ми отримали значно кращі показники шорсткості поверхні. При цьому необхідно було контролювати збільшення швидкості різання, щоб це також не призвело до відмови від зносу інструменту. На рис. 1.11 представлено механізм зношування інструменту деталей із сірого чавуну СЧ15.



а



б

Рисунок 1.11 – Механізм зношування інструменту:
а) сліди стирання; б) внутрішні дефекти заготовки

Дослідження показало, що поверхня мікрошліфувальної машини в обох напрямках (горизонтальному та вертикальному) була більш гладкою, що в цілому не послаблювало ефективності процесу обробки на якісному рівні. У деяких місцях поверхня компонентів неоднорідних матеріалів СЧ15 була розірвана через появу пор і погане травлення компонентів (рис. 1.12).

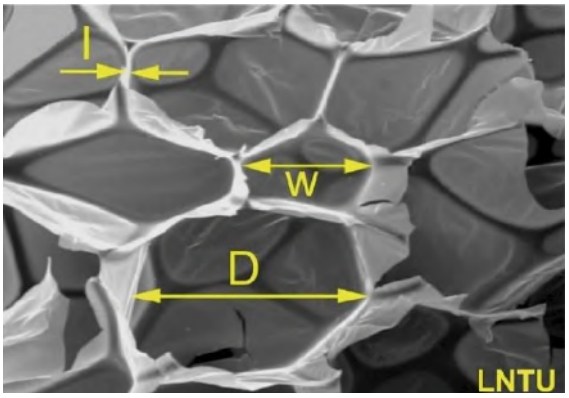


Рисунок 1.12 – Мікроструктура неоднорідних матеріалів сірого чавуну марки СЧ15

Отримані результати показали, що керування силою різання може призвести до збільшення шорсткості поверхні неоднорідних матеріалів СЧ15. Крім того, варіації мікроструктури матеріалу СЧ15 забезпечують сприятливі умови обробки для отримання бажаного результату.

Одним із суттєвих моментів є нормування параметрів шорсткості, які розраховуються за показниками R_a, R_z та KR_a. Слід зазначити, що нормування шорсткості зразків проводили згідно ГОСТ 9378-93. У табл. 1.5 наведені основні параметри шорсткості поверхні для зразків СЧ15, зафіксовані під час дослідження.

Таблиця 1.5 – Основні параметри шорсткості поверхні зразків СЧ15

Тип плити	Найменування токарного інструменту	Подача, (мм)	Швидкість (м/хв)	Швидкість подачі, VB, (мм)	KB, (мм)	R_z (мкм)	R_a (мкм)	KR_a (—)
CC1	M-08-100	0,22	101	0,5	0,122	9,34	1,82	1,82
	M-08-70		72	0,4	0,098	8,65	1,75	2,19
	M-08-50		50	0,6	0,145	12,2	1,99	2,43
CC2	U-08-100	0,2	100	0,4	0,058	7,64	1,87	2,19
	U-08-70		70,2	0,3	0,049	7,64	1,64	2,14
	U-08-50		51	0,4	0,072	7,99	1,75	2,01
CC3	U-03-70-2	0,21	69	0,7	0,033	13,82	2,02	1,42
	U-03-70—01	0,1	69	0,2	0,021	6,24	1,08	3,14

Встановлено, що перший критерій шорсткості поверхні СЧ15 залежить від вибору токарної пластини, межі якої коливаються від R_a = 1,08 мм до R_z = 2,02

мм. Другим критерієм був максимальний бічний знос, середнє значення якого склало: VB = 0,148 мм.

На рис. 1.13 представлено практичні результати визначення параметрів шорсткості структурно неоднорідних матеріалів СЧ15. Слід зазначити, що згідно зі згаданим стандартом похибка відхилення максимального зносу лежить в межах до 2 мм. Це значення дозволило завершити процес тестування, оскільки отримані результати повністю відповідають умовам зношування згідно стандарту.

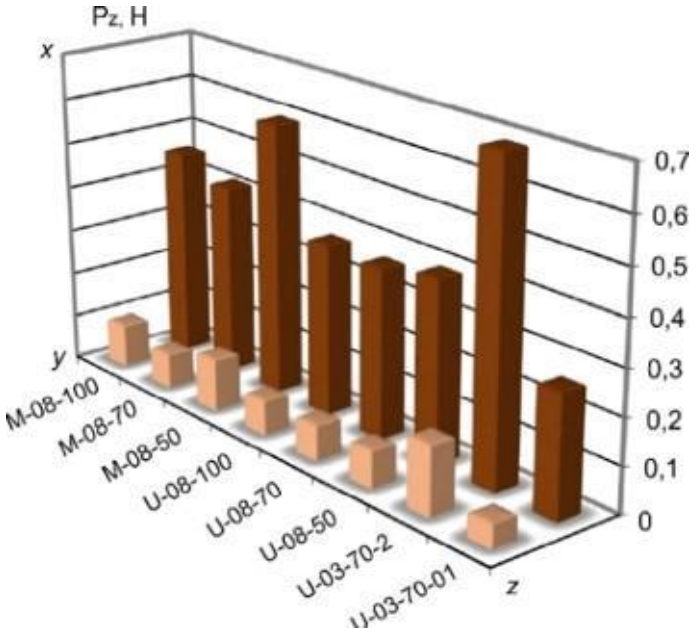


Рисунок 1.13 – Практичні результати основних параметрів шорсткості зразка

Слід також зазначити, що мінімальна шорсткість поверхні зразків та отримані основні параметри сприятливо впливають на розмір, форму та крихкість стружки. Це подовжує термін служби ріжучого інструменту і дозволяє визначити середню довжину різання, що дорівнює LSC = +- 10 м.

Сучасні технології CAD/CAM/CAE дозволили одночасно поєднати 2D моделювання заготовки деталі (рис. 1.10) з розрахунком конструкції самої деталі в 3D моделюванні (рис. 1.14).

При цьому створення раціонального технологічного процесу його виробництва з швидкою передачею на верстатах з ЧПК, а також представлення його в 3D моделюванні. Кількісні результати 3D-моделювання показують оцінку

наступних основних параметрів: аналіз сили тертя, якість отвору, залишкові напруги, розмір задирок, питома енергія різання, поломка інструменту, крутний момент, руйнування, твердість, ефект робочої відстані, представлено рельєф, мікротвердість, механічні властивості, шорсткість поверхні, зношування інструменту, температуру різання, силу різання, мікроструктуру, розмір, форму та морфологію стружки деталей із сірого чавуну марки СЧ15. На рис. 1.14 представлено 3D модель частини корпусу Т-207.

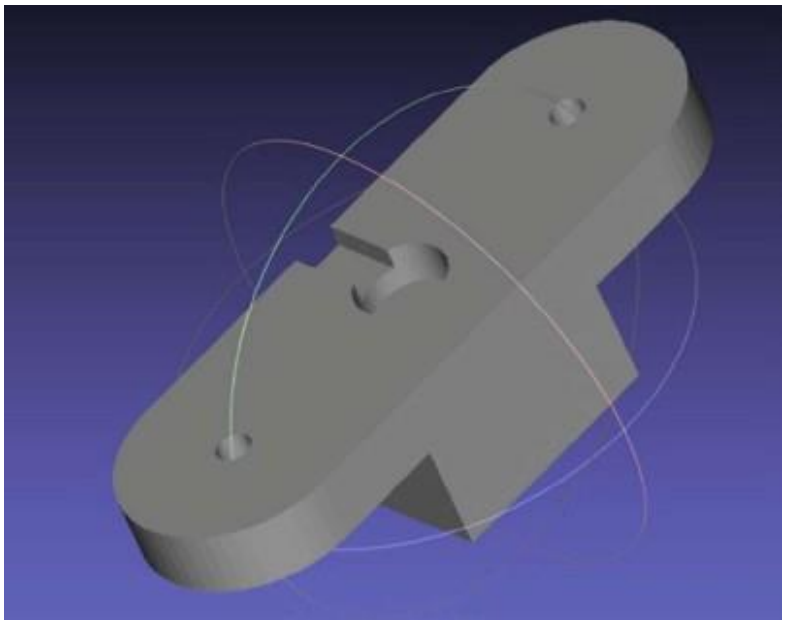


Рисунок 1.14 – 3D модель частини корпусу деталі типу Т-207

Змодельований корпус Т-207 має низку переваг, зокрема: високу корозійну стійкість, відсутність дефектів стрижня, високу точність і механічну обробку в цілому. Корпус із сірого чавуну марки СЧ15 призначений для фіксації (закріплення) обойм будь-яких підшипників і установки їх у вироби, а також займає значний сегмент в асортименті ливарної продукції, що є суттєвими перевагами для технології адитивного (будь-якого) виробництва. Слід також зазначити, що структурно неоднорідні матеріали, які використовуються в технології виготовлення корпусів, є найбільш раціональним і економічно виправданим підходом з точки зору адитивного виробництва. Це дозволяє забезпечити унікальність виготовлення виробів із використанням стандартних розмірів і технічних характеристик, виводячи продукцію на якісний рівень.

Таким чином, після проведення аналізу цілісності поверхні було представлено механізм зношування інструменту, де були зафіксовані сліди стирання та ідентифіковані деякі внутрішні дефекти заготовки.

На підставі ряду досліджень нами надано рекомендації щодо мінімальної шорсткості поверхні зразків та обґрунтовано максимальний знос інструменту, середнє значення якого становить VB = 0,148 мм. Крім того, середня довжина різання LSC = +- 10 м.

Встановлено, що шорсткість поверхні зразків і отримані на їх основі основні параметри сприятливо впливають на розмір і форму стружки, а також на крихкість.

Сучасні технології CAD/CAM/CAE дозволили передбачити високу корозійну стійкість, відсутність дефектів стержня, надзвичайну точність і механічну обробку в цілому.

1.1.2.2 Спосіб дифузійної металізації твердих сплавів

Відомий спосіб нанесення дифузійних карбідних покриттів на поверхню твердих сплавів, при якому виріб розміщують в камері з порошком карбідоутворюючого металу, нагрівають до температури 950-2000 °С, вводять чотирихлористий вуглець та витримують впродовж 2-4 годин [81].

Недоліком цього способу є недостатня товщина шарів та невисока жаростійкість, яка характерна для сполуки карбіду ванадію VC, недостатня зносостійкість твердосплавного інструменту із вольфрамо-кобальтового твердого сплаву (ВК6 (W(94 %), Co(6 %))). [82]

Найбільш близьким за технічною сутністю, вибраний в якості прототипу, є спосіб отримання карбідних покриттів на поверхні металів і сплавів, який включає завантаження до камери зразків твердих сплавів ВК8 22 г/м^2 карбюризатора та 78 г/м^2 порошку ванадію. Герметизування реакційної камери, вакуумування до тиску 10^{-1}мм.рт.ст., нагрів до температури насичення 1050 ^{0}С, повторне вакуумування до тиску 10^{-1}мм.рт.ст., введення чотирихлористого вуглецю 5 мл/м^2, ізотермічна витримка при температурі насичення впродовж 2 годин [83].

Недоліком цього способу є низька припрацьовуваність покриттів при обробці різанням за рахунок високої крихкості та твердості робочої поверхні, що може привести до руйнування ріжучої кромки. [82]

В основу корисної моделі поставлена задача удосконалити відомий спосіб шляхом попереднього азотування зразків, що забезпечує підвищення зносостійкості. [82]

Поставлена задача вирішується тим, що у способі нанесення дифузійних покриттів, який включає завантаження до камери зразків, карбюризатора та порошку титану, герметизування реакційної камери, вакуумування, нагрів до температури насичення 1000-1050 ^{0}C, повторне вакуумування, введення чотирихлористого вуглецю 4-5 мл/м^2, ізотермічну витримку при температурі насичення впродовж 2-4 годин, згідно корисної моделі, перед процесом ванадіювання зразки підлягають азотуванню в середовищі аміаку. [82]

В результаті насичення відбувається утворення двошарового карбонітрідного покриття., яке складається з двох шарів: внутрішнього, на основі нітриду ванадію VN, та зовнішнього – карбіду ванадію V_2C, що призводить до підвищення зносостійкості. [82]

Спосіб здійснюють в два послідовні етапи. Перший етап - азотування, проводять в атмосфері аміаку при рівні дисоціації 47-55 % при температурі 540 ^{0}C впродовж 20-36 годин. Другий етап - ванадіювання, проводять наступним чином: проазотовані зразки та насичуючу суміш, яка складається з 50 г/м^2 ванадію (V) та 25 г/м^2 деревного вугілля, розміщують в герметичній реакційній камері. Камеру з вмістом вакуумують до тиску 10^{-1}мм.рт.ст., нагрівають до температур насичення 1050 ^{0}C, ще раз вакуумують до тиску 10^{-1} мм.рт.ст., вимикають насос, вводять чотирихлористий вуглець із розрахунком 3-4 мл/м^2 робочої поверхні та здійснюють ізотермічну витримку. Загальний час процесу обробки - 2 години. Охолодження виробів до кімнатної температури повільне, разом з камерою. [82]

Приклад конкретного виконання способу.

Азотування проводили в виробничих умовах за відомою технологією в шахтній печі в середовищі аміаку при ступені його дисоціації 47-55 % при температурі 540 ^{0}С впродовж 36 годин. [82]

Дифузійну металізацію (ванадіювання) реалізовували в замкнутому реакційному просторі в умовах зниженого тиску газової фази в спеціальній установці на базі шахтної печі СШОЛ 1.1.6/12. [82]

В чашки спеціально розробленого пристосування- вставки, виготовленого з вуглецевої сталі, розміщують порошок ванадію, дисперсністю 100-300 мкм. Підготовлені до насичення зразки фіксують у вставці таким чином, щоб безпосереднього контакту з порошком не відбувалося. До реакційної камери – реторти, виготовленої зі сталі 12Х18Н9Т, засипають деревне вугілля та розміщують вставку із зразками та порошком. Для забезпечення в реторті герметичності і необхідного ступеня розрядження між її корпусом і кришкою передбачене вакуумне ущільнення. Верхня частина камери охолоджується водою, яка циркулює в привареній до корпусу втулці, що запобігає згоранню вакуумного ущільнення при підвищених температурах і розгерметизації камери. [82]

Після герметизації реакційну камеру вакуумують до 10-20 Па за допомогою вакуумного насосу НВР 5Д. Тиск у реакційній камері вимірюють за допомогою вакуумметра ВІТ-1А ПС 9. Паралельно з цим процесом переміщують реторту до печі, нагрітої до температури 1050 0С. При досягненні зазначеного вище тиску вакуумний насос вимикають. Швидкість нагріву 300 – 350 °С/год. При нагріві печі до температури насичення проводять введення чотирихлористого вуглецю. Введення чотирихлористого вуглецю в необхідній кількості в реакційну камеру здійснюють зі спеціальної ємкості через вакуумний кран. Вимір і автоматичне регулювання температури в процесі нагрівання та ізотермічної витримки здійснювали за допомогою потенціометра марки ЗПД-37 і хромель- алюмелівої термопари марки ПП-1, гарячий спай якої розміщувався в середині електричної печі вздовж стінок камери.

Попередньо проазотовані зразки твердих сплавів ВК8 завантажують до реакційної камери, в якій розміщають деревне вугілля (25 г/м^2) та порошок

ванадію (50 г/м^2). Камеру герметизують, вакуумують до тиску 10^{-1}мм.рт.ст., нагрівають до температури 1050˚С, вакуумують повторно, вводять чотирихлористий вуглець (4 мл/м^2) та здійснюють ізотермічну витримку. Загальний час ізотермічної витримки становить 2 години. Вироби охолоджують в реакційному середовищі до кімнатної температури. [82]

В результаті чого на поверхні пластин ВК8 утворюються покриття, яке складається зі внутрішнього шару нітриду ванадію VN товщиною 2-3 мкм, з мікротвердістю 16,0-16,3 ГПа та зовнішнього шару карбіду ванадію V_2C товщиною 4-5 мкм з мікротвердістю 19,1-20,0 ГПа. [82]

Більш досконале вивчення процесу азотованадіювання за запропонованим методом дало підстави говорити про те, що при нагрівання азотованих виробів в середовищі ванадію нітриди заліза та легуючих елементів дифундують за двома напрямками всередину зразка та до поверхні, при цьому відбувається процес утворення нітриду ванадію. Після цього утворюється карбід ванадію.

Результатом випробувань твердосплавних пластин ВК8 після азотованадіювання при чистовому точінні (швидкість точінння 2,5-3,5 м/с, подача 0,2-0,4 мм/об, глибина різання 0,8-1,0 мм.) валів зі сталі 30ХГС твердістю 46 HRC є підвищення стійкості в 1,8-2,0 рази в порівнянні з вихідними. За період випробувань брали час до утворення допустимої величини зношування різця по задній поверхні 0,7 мм. [82]

Таким чином, запропонований метод технологічно простий та економічний, завдяки використанню традиційного обладнання, відносно низьких робочих температур та відсутністю необхідності залучення висококваліфікованого обслуговуючого персоналу.

1.1.2.3 Вплив магнітно-імпульсної та хіміко-термічної обробки на поверхневий шар легованих сталей

Більшість деталей та інструментів працюють на поверхнях, що сильно зношуються. Тому виникає необхідність захисту поверхні під час експлуатації. Підвищення зносостійкості ріжучих інструментів і деталей машин, виготовлених

із традиційних інструментальних матеріалів, ефективно підвищує продуктивність.

Зносостійкість поверхневих шарів сталевих деталей можна підвищити за допомогою різних методів поверхневого зміцнення. Фізико-механічні, теплофізичні та кристалохімічні властивості матеріалу сильно впливають на різальний інструмент і деталі машин. Оптимальне поєднання цих властивостей дозволяє нам контролювати та зменшувати швидкість зносу контактних поверхонь.

Різноманітність методів поверхневої зміцнюючої обробки поділяють на такі групи: деформаційного впливу, термічної обробки, поверхневого легування, покриття та комбінована обробка [84]. Актуальною проблемою є підвищення надійності машин і інструментів. Це ускладнюється режимами роботи металевих частин, які працюють в умовах тертя, з високими тепловими і механічними навантаженнями, в агресивних середовищах.

Багато методів зміцнення поверхні засновані на нанесенні покриття або зміні стану поверхні. Традиційні підходи до підвищення ефективності сталевих деталей недостатньо забезпечують необхідні властивості. Важливою метою є збільшення терміну служби та зносостійкості деталей машин та інструментів за рахунок армування. Рішення цієї проблеми дозволяє істотно збільшити їх довговічність та заощадити дорогі та дефіцитні матеріали, енергію та працю.

Існуючі методи хіміко-термічної обробки зазвичай забезпечують ефективність деталей в умовах тертя та зношування. Однак ці методи є досить тривалими та потребують комплексного та дорогого обладнання [85].

Таким чином, актуальним є пошук нових методів підвищення ефективності інструментів і деталей машин. Вирішення цієї проблеми має підвищити зміцнення поверхневих шарів і розробити методи, які значно збільшують процес зміцнення без погіршення властивостей виробів. Методи, що належать до різних груп, по-різному впливають на поверхневий шар різальних інструментів і деталей машин.

Поверхневий шар матеріалу зміцнюється при виникненні ефекту деформації [86]. При цьому змінюється його мікрогеометрія та

енергозабезпечення. В результаті термічного впливу на поверхневий шар сплавів змінюється структура шару. При цьому його хімічний склад залишається незмінним. Поверхневі сплави змінюють структуру і хімічний склад поверхневого шару. Утворення тонкої плівки доповнює покриття на поверхні і деталях інструменту. Методи поверхневого зміцнення призводять до зміцнення поверхневого шару виробу за рахунок наступних механізмів і комбінацій: субструктурного, твердого розчину, полікристалічного та багатофазного зміцнення [87].

Методи поверхневого зміцнення, засновані на деформаційному впливі, не знайшли широкого застосування у виготовленні різального інструменту. Вони в основному використовуються для зміцнення широкого спектру деталей машин.

Для виготовлення деформацій зміцнення включає струменеву обробку [88], магнітно-імпульсну обробку [89], зміцнення вибухом [90], прокатку [91], ультразвукову обробку [92]. Кожен спосіб зміцнювальної обробки, заснований на деформаційному впливі на ріжучий інструмент, має такі характеристики: механіку деформування, особливості формування геометричних і фізико-механічних властивостей поверхневого шару, умови процесу.

Методи обробки діляться на статичні і динамічні. Для статичних методів (наприклад, прокатки і пресування) характерна стаціонарність сили деформації, вплив і безперервність контакту між деформуючим елементом і різальним інструментом. Динамічні методи (наприклад, струменева обробка, вібрація, ультразвукова обробка, тиснення) характеризуються переривчастим контактом та імпульсним впливом деформуючих елементів на поверхню ріжучого інструменту [93]. Крім того, застосовуються поширені способи поєднання статичних і динамічних навантажень.

Усі методи магнітної обробки інструментів і деталей машин класифікують наступним чином: обробка статичним магнітним полем (напруженість 100–1000 кА/м при експозиції 10–300 с); магнітно-імпульсне поле обробки (напруженість 50–2000 кА/м при тривалості імпульсу 0,1–10 с).

Перший спосіб включає наступні етапи: обробка розмагнічування протягом 8–24 год; обробка одиничним імпульсом зі спрямованим (локальним)

зосередженням магнітного потоку на деталі; динамічна обробка, коли виріб знаходиться в полі постійної напруги і обертається зі швидкістю обертання 1–50 $с^{-1}$ протягом 1–5 хвилин; обробка з вільним переміщенням заготовки в порожнині індуктора

Магнітно-імпульсний метод обробки включає наступні етапи: обробка без подальшого розмагнічування; поліциклічна обробка (2–10 циклів) з експозицією між циклами 1–20 хв; обробка з використанням феромагнітних сердечників; локальні концентратори магнітного поля; і механічна обробка в металевих контейнерах або камерах з використанням ферорідини. Майже всі ці способи вимагають подальшої витримки заготовки на неметалевих підкладках протягом 5–24 год.

Інструменти з вуглецевої сталі потребують високошвидкісної обробки за 1–2 цикли при тривалості імпульсу 0,3–1,5 с і витримці після обробки приблизно 8–12 год. Збільшення маси інструменту збільшує оптимальний час імпульсу в 2-3 рази. Інструменти з твердих сплавів і композиційних матеріалів потребують обробки 5-10 циклами під напругою до 4000 кА/м в ємності з феромагнітною рідиною. При цьому експозиція між циклами обробки залежить від маси, геометрії та розмірів інструменту, які змінювалися в діапазоні 0,5–5 хв [96].

Найбільш перспективним напрямком підвищення стійкості різального інструменту з феромагнітних матеріалів є магнітно-імпульсна обробка. Така обробка дозволяє збільшити ресурс інструменту за рахунок зміни механічних властивостей матеріалів. Цей ефект досягається за рахунок складних магнітострикційних структурних змін. Для поверхневого зміцнення інструментів і деталей машин можна застосовувати такі процедури: термічний вплив [94], лазерне зміцнення [95], електронно-променева обробка [96], кріогенна обробка [97, 98, 99]. Серед різноманітних методів поверхневе легування є найбільш застосовним для виготовлення інструменту з легованих сталей після хіміко-термічної обробки [100].

Хіміко-термічна обробка ріжучого інструменту включає технологію дифузійного насичення поверхневого шару такими елементами , як вуглець, азот,

бор. При цьому застосовували цементацію, азотування [101], нітроцементацію [102], борування [103].

Слід зазначити, що вибір правильного методу хіміко-термічної обробки залежить від вимог до поверхневого шару інструменту та термостійкості матеріалу інструменту. При іонній імплантації в поверхневий шар опромінюваного матеріалу виникають радіаційні дефекти [104]. Ці ефекти призводять до зміни властивостей матеріалу (наприклад, мікротвердості, в'язкості, пластичності, теплопровідності та електричного опору). Однак іонна імплантація не знайшла широкого застосування в інструментальному виробництві через високу вартість і відносно низьку продуктивність. У разі імплантації шарів значної товщини ці недоліки особливо помітні.

Також поширені лазерне легування [105], електроерозійне легування [106] і плазмове легування [107]. Лазерне зміцнення поверхні, яке здійснюється висококонцентрованим випромінюванням, фокусується на невеликій площі (фракції в діапазоні 1–10 мм) [108]. Цей метод обробки зміцнює інструменти, включаючи швидкорізальну сталь, тверді сплави та кераміку. Однак зміцнення поверхневого шару матеріалу шляхом зміни його структури і хімічного складу досягається на невеликій глибині (до 80 мкм).

Є недоліки електронно-променевої обробки: необхідність захисту від рентгенівського випромінювання при напрузі понад 20 кВ; відносно висока вартість; відносна складність технологічного обладнання. Одними з найефективніших способів забезпечення оптимального поєднання «міцність-пластичність» матеріалів ріжучого інструменту є методи нанесення зносостійких покриттів, високотемпературні методи (HT), хімічне осадження з парової фази (CVD), фізичне осадження з парової фази (PVD). , електролітичний метод, газотермічне напилення та зварювання [109].

Процес CVD зазвичай базується на гетерогенних хімічних реакціях у парогазовому середовищі, що оточує ріжучі інструменти. В результаті отримують довговічне покриття [110]. Покриття з тугоплавких сполук шляхом осадження з газової фази засновані на відновленні легких сполук металів воднем у присутності активних компонентів газової суміші. Вони взаємодіють з

вивільненими компонентами, які не містять металу, і утворюють відповідну тугоплавку сполуку. Процес HT-CVD реалізується при відносно високих температурах (до 1100 ^{0}C). Такі температури виключають цей метод для інструментів із швидкорізальної сталі. Однак нанесення покриттів на твердосплавні інструменти, нагріті до таких високих температур, часто негативно позначається на їх роботі. Твердосплавні інструменти з CVD-покриттям мають підвищену схильність до крихкого руйнування і викришування. Особливо яскраво цей факт проявляється при переривчастому різанні при циклічному навантаженні, наприклад, при обробці важкооброблюваних сплавів з великою товщиною зсувного шару. Покриття не витримує циклічних навантажень, оскільки товщина зазвичай не перевищує 3–5 мкм (тобто при точінні ця величина може досягати 15 мкм).

Основним напрямком удосконалення твердого сплаву з CVD-покриттям є зниження крихкості поверхневого шару. Технологія MT-CVD також не здатна вирішити цю проблему. Величина напруги розтягу в поверхневому шарі покриттів дещо нижча, ніж отримана методом високотемпературного CVD. Однак цього все ще достатньо, щоб призвести до зародження тріщин. При використанні покриття PA-CVD на інструменті хімічні реакції в газовій фазі утворюються під час дії плазми газу, що проходить через високочастотний електричний розряд [111]. Порівняно з CVD основними перевагами процесу PA-CVD є те, що немає необхідності нагрівати інструмент на основі високих температур (до 600 ◦C) а Висока міцність адгезійного зв’язку між покриттям і основою інструменту. Водночас керування процесами PA-CVD часто є досить складним. Осадження чистих матеріалів цим методом неможливе, оскільки осад зберігає майже всі необхідні гази. Іншим недоліком є сильна взаємодія плазми зі зростаючою плівкою. Висока швидкість осадження призводить до поганого контролю однорідності і вимагає ретельного налагодження реакційної установки. Розглянуті вище способи підвищення зносостійкості ріжучих інструментів і деталей машин можуть бути використані як комбіноване зміцнення. Проте у виробництві знайшли застосування лише деякі з них, такі як зносостійкі покриття [112], лазерна обробка [113], іонне азотування [114],

зносостійкі покриття [115], лазерне легування [116], азотування [117], кріогенно-ерозійної обробки [118]. Таким чином, традиційні методи обробки деталей машин і інструментів мають багато невирішених питань. В основному вони не забезпечують достатньої товщини зміцненого шару, потребують тривалих процесів, важкі у використанні та енерговитратні. Тому постійне підвищення технологічних характеристик для отримання високих експлуатаційних властивостей виробів потребує пошуку перспективного напряму підвищення ефективності ріжучих інструментів і деталей машин. Цей напрямок слід тісно доповнювати розробкою ефективних технологій поверхневого зміцнення. Загалом, розробка методів, які суттєво скорочують процес твердіння без шкоди для властивостей продукту, є актуальною проблемою.

Метою даної роботи було вивчити вплив різних режимів зміцнювальної обробки, таких як магнітно-імпульсна обробка (МІО) та хіміко-термічна обробка (ХТО), на зміну властивостей поверхневого шару легованих сталей і твердих сплавів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

− дослідити зміни поверхневої твердості та товщини зміцненого шару твердосплавного різального інструменту, отриманого обробкою імпульсним магнітним полем (ІМП);

− визначити поверхневу твердість і товщину зміцненого шару легованих сталей після азотування в азотовмісній нанодисперсній речовині з активаторами;

− дослідити зміни твердості та товщини поверхні загартованого шару легованої сталі після борування в нанодисперсному порошку.

Об’єктом дослідження були твердосплавні пластини Т5К10 та ВК8 розміром 15,875 × 15,875 × 4,760 мм для точіння прохідних і розточувальних і торцевих фрез. Використовували циліндричні зразки діаметром 12 мм і довжиною 20 мм з легованих сталей, підшипникової сталі, швидкорізальних інструментальних сталей у кількості 10 штук кожного сплаву. Магнітно-імпульсне зміцнення проводили на установці «MIU SFT 9.120.00.00.000» (виробництва Фізико-технічного інституту Республіки Білорусь).

Установкою для магнітно-імпульсної обробки металів був генератор імпульсного струму (ГІС). Він складався з ємнісного накопичувача електричної енергії високовольтних конденсаторних батарей, котушок індуктивності та високовольтних керованих розрядників робочого органу комутаційного пристрою. За допомогою розрядника відбувається розряд батареї конденсаторів на індуктор [119].

Контрольний пристрій використовувався для керування процесом магнітно-імпульсного зміцнення. Сюди входить схема управління реле часу «ВЛ-159М» і виконавчі механізми в реле і магнітних пускачах. Управління пристроєм дозволило встановити режим обробки продукту, враховуючи питому імпульсну енергію, встановивши час заряду. Останнє реалізовано за допомогою програмованого реле часу ВЛ-159М, яке керує обробкою продукту. Такий підхід дозволив більш точно підібрати режими обробки продукції. Вибір типу функціональної схеми та встановлення необхідного часу експозиції також здійснювався за допомогою цього реле часу. Відповідно до встановлених режимів здійснювався контроль автоматичного розпалювання та розряду за рахунок обробки завантажених предметів.

Обробку зразків із підшипникової сталі ШХ15 проводили в такій послідовності: установка зразків в індуктор; вибір режимів; вплив імпульсного магнітного поля на зразки; видалення оброблених зразків; і подальше витримування протягом 24 год. Після обробки необхідно було провести старіння зразків для завершення внутрішніх процесів, пов’язаних з розсіюванням електромагнітної енергії в матеріалі [36]. Досліди проводили при енергії 6,56 кДж з кількістю імпульсів від 2 до 9.

Магнітно-імпульсну обробку (МІО) вставок із твердих сплавів проводили на роботизованому комплексі «ППМФ РК-1» (виробництва Донбаської державної машинобудівної академії ім. Україна) на основі обробки імпульсними режимами магнітного поля. Цей комплекс забезпечує найбільш суттєве підвищення цієї величини (напруженість поля — $1{,}1 \times 10^5$ А/м; тривалість МІО — 2 хв; час експозиції після обробки — 28 год; частота імпульсів — 5 Гц). Він складається з генератора імпульсів з джерелом живлення та котушки

індуктивності. Генератор імпульсів і джерело живлення виконані як індивідуальне стендове обладнання. Індуктор підключався до кабелю генератора [120]. Індуктор розташовувався на горизонтальній діелектричній діамагнітній поверхні (наприклад, пластик, дерево, гума) для обробки невеликих виробів. Її вісь повинна бути вертикальною. Продукти поміщали всередину індуктора, а сеанс обробки тривав 120 с.

Основним технологічним параметром блоку керування є робоча напруга блоку як напруга розряду ланцюга конденсатора, що створює імпульси магнітного поля. Відповідне значення відображалося за допомогою певного приладу на передній панелі генераторного блоку. Регулювання робочої напруги здійснювалося обертанням ручки. Проаналізовано геометрію соленоїдів для магнітних індукторів щодо їх оптимальності та здатності забезпечувати необхідні значення напруженості магнітного поля. Ослаблення магнітного поля робочого зазору призводить до збільшення довжини соленоїда.

Зміцнюючу обробку інструментів і деталей машин реалізовували при насиченні поверхні сталевих зразків атомами елементів — азотом і бором.

Азотування проводили в нанорозмірних азотовмісних речовинах з активаторами [121, 122]. Перед азотуванням зразки сталей піддавалися гартуванню з подальшим високим відпуском. Поверхні зразків зі сталі 40Х, підшипникової сталі ШХ15, швидкорізальної інструментальної сталі Р6М5, швидкорізальної інструментальної сталі Р18 попередньо очищали та знежирювали від слідів окалини, іржі, масла та інших забруднень. Зразки поміщали в ємність, наповнену сумішшю. Ємність герметично закривали і поміщали в камерну піч. Азотування проводили в інтервалі температур 450–650 ^{0}С протягом 1–7 год.

Борування сталей проводили після відпалу. Після завершення сушіння порошку для пасти в печі на підготовлені зразки наносили шар пасти з нанодисперсних порошків товщиною 2–3 мм. Зразки з нанесеним шаром пасти поміщали в тигель і покривали сполукою бору. Борування поводили при ізотермічній витримці в інтервалі температур 800–1000 ^{0}С протягом 15–120 хв.

Досліджено металографічну структуру на мікроскопі «МІМ-8» (росія) за стандартною методикою при різних збільшеннях, шляхом вивчення мікроструктури та товщини дифузійних шарів.

Товщину азотованого покриття брали на відстані від поверхні до шару, твердість якого відрізняється від твердості серцевини на 50 МПа. Товщина борованого покриття вимірювалася від поверхні зразка.

Визначення мікротвердості захисних шарів покриття проводили на твердомірі «ПМТ-3» (росія, метод Віккерса) при навантаженні 50 г і 100 г впродовж 7–15 с. Для вимірювання різних шарів використовувалися різні навантаження. Тобто, щоб визначити більш твердий борований шар, використовували ваги 100 г (навантаження 50 г дає занадто малий відбиток). Тому для точності визначення мікротвердості для шарів різної твердості доцільно застосовувати різне навантаження. Для спрощення запису та сприйняття результатів значення мікротвердості переведено в ГПа; наприклад, 20 ГПа відповідає $2000HV_{100}$. Саме середні значення мікротвердості вказуються в дослідженні. Для кожного зміцненого (дифузійного) покриття було зроблено п'ятнадцять вимірів мікротвердості кожного зразка. Для кожного режиму обробки було досліджено п'ять зразків. Похибка вимірювання склала 5 %.

Для дослідження сталей і сплавів проводили зйомку дифрактограм на рентгенівському дифрактометрі загального призначення «ДРОН-3М» (росія). Зйомку сталей проводили в рентгенівському випромінюванні хрому. Для аналізу покриттів на твердих сплавах використовували рентгенівське випромінювання Cu.

Для випробувань на знос досліджували абразивну зносостійкість на стенді «АР 40.613.20 R 43/82» (Німеччина). Ступінь зносу визначали шляхом контролю втрати маси досліджуваного зразка.

Експериментальне визначення товщини зміцненого шару та твердості поверхні після МІО виробів із підшипникової сталі ШХ15

Середнє значення мікротвердості зразків до обробки становило 2,4 ГПа. Наведений аналіз залежностей показує, що мікротвердість оброблених зразків

збільшилась на 40–50 %. Глибина зміцненого шару 80–100 мкм [123]. У новій технології магнітно-імпульсного зміцнення магнітно-імпульсна дія речовини змінює її фізико-механічні властивості. Взаємодія імпульсного магнітного поля з заготовкою провідного матеріалу ефективна при більших ступенях структурної та енергетичної неоднорідності. Отже, більша концентрація поверхневих і внутрішніх напружень у металевих частинах свідчить про більшу ймовірність локальної концентрації мікропроводів зовнішнього поля. Цей ефект призводить до розігріву зон навколо кристалів напружених блоків неоднорідності структури металу. Вищий градієнт теплового потоку при магнітно-імпульсній обробці свідчить про те, що структура металу є менш однорідною. Після обробки відбувається поліпшення мікроструктури сплаву, що призводить до зміни фізико-механічних характеристик матеріалу.

Експериментальне дослідження впливу МІО на надійність ріжучого інструменту з твердого сплаву Т5К10

Оцінено вплив МІО на стабільність ріжучих властивостей пластин із твердих сплавів (наприклад, Т5К10) під час чорнового точіння. Проаналізовано зміну мікротвердості до та після обробки. На основі аналізу розподілу мікротвердості на поверхні твердого сплаву встановлено, що в результаті МІО мікротвердість зростає в середньому від 16,1 ГПа до 16,9 ГПа. Коефіцієнт варіації мікротвердості зменшується від 0,13 до 0,06. У вихідному стані та після обробки як метод дослідження використовували рентгенографічний аналіз. Це найефективніший метод визначення структурних характеристик багатофазних кристалічних твердих тіл [124]. Зміна параметрів решітки Co і TiC після обробки показує, що лінії (100) Co і (220) TiC зміщуються в бік більших кутів. Цей факт свідчить про зменшення спотворень параметрів ґратки, підтверджує деформацію карбіду фази кобальту Т5К10 та свідчить про підвищення міцності твердого сплаву [125].

При обробці твердих сплавів досліджено вплив МІО на структуру та властивості деталей. Відомо, що сполучна фаза значною мірою визначає міцність твердих сплавів. Спостереження за тріщинами показало, що деструктивні тріщини поширюються в сплавах ВК8 і Т5К10, головним чином у фазі кобальту.

У сплавах Т5К10 руйнівна тріщина в основному поширюється фазою (Ti,W)C, кобальтовий компонент може перешкоджати руйнівній тріщині. Це пояснюється тим, що кобальтова фаза твердих сплавів є твердим розчином W і C в кубічному Co. Впорядковане розташування атомів має меншу внутрішню енергію, ніж невпорядковане розташування, головним чином, якщо розподіл атомів у кристалічній решітці відбувається при відносно низьких температурах. Зміни властивостей кобальтової фази після МІО зводяться до перегрупування атомів під дією магнітного поля. Що стосується енергії, необхідної для перекристалізації або поділу дисперсної фази, магнітне поле з більшою енергією створює МІО -ефект. Така обробка не впливає на фазовий склад і текстуру матеріалу. Однак фаза вибору, кристалізація або напруга можуть розвинутися на додаток до кристалографічних напрямків, так що енергія кристалізації або поділу буде мінімальною в певному напрямку залежно від напрямку магнітного поля. Підвищення стабільності ріжучих властивостей твердого сплаву пов’язане з гомогенізацією фази кобальту під дією імпульсного магнітного поля. Застосування віброабразивної обробки перед впливом магнітного поля посилює інтенсивність перехідних напружень у фазі кобальту від розтягуючих до стискаючих. Цей ефект підвищує міцність і стабільність ріжучих властивостей інструменту. Аналіз характеру зміни значень ліній з різними режимами МІО показав, що для твердих сплавів існує значення напруженості магнітного поля в МІО. Це поле викликає максимальне зміщення дифракційних ліній кобальтової фази та збільшує інтенсивність лінії (100) Co, яка дорівнює приблизно 1,8·105 А/м. Нарешті, дослідження показали, що ріжучий інструмент, оснащений пластинами з твердих сплавів Т5К10 і ВК8, має стійкість відносно необробленого ВК8 на 183 %, а Т5К10— більш ніж на 200 %. Процес зношування пластин із ВК8 та Т5К10 характеризується відсутністю пластичних деформацій форми ріжучої частини та відсутністю розтріскування. Підвищення міцності твердосплавних пластин для токарних інструментів, оброблених імпульсним магнітним полем, відбулося за рахунок стабілізації балансу напружень у фазі кобальту.

Цей ефект також запобігає поширенню деструктивних тріщин і підвищує міцність матеріалу.

Експериментальне визначення товщини зміцненого шару та твердості поверхні після азотування.

Мікроструктура дифузійних шарів, отриманих шляхом азотування різних сталей у ємності з азотовмісною речовиною, подібна до дифузійних шарів після традиційного газового азотування (рис. 1.15 та 1.16). Підвищення температури призводить до збільшення товщини нітридного шару. Характер кривих однаковий для всіх досліджуваних сталей. Однак глибина шару сильно залежить від складу сталі. Для всіх досліджуваних легованих сталей підвищення температури азотування від 450 ^{0}C до 700 ^{0}C призводить до збільшення товщини дифузійного шару від 0,15 мм до 0,28 мм (при температурі 450 ^{0}C), а від 0,45 до 0,70 мм (при температурі 700 ^{0}C). Як відомо, при традиційному тривалому газовому азотуванні протягом 40–100 год товщина шару зменшується зі збільшенням вмісту в сталі вуглецю та легуючих елементів.

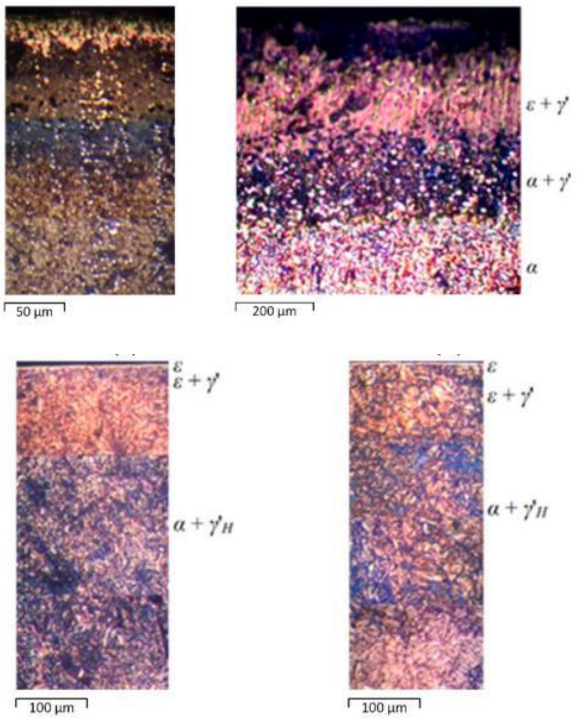


Рисунок 1.15 – Мікроструктура сталі Р6М5 (а), ХВГ (б), 40Х (в), та 18Х2Н4М (г) після азотування (Т- 550 ^{0}C τ- 5 г)

Цей факт пов'язаний з коагуляцією, зростанням і сфероїдизацією карбідів і нітридів в легуючих елементах для такої безперервної хіміко-термічної обробки. Примітно, що цей процес не відбувається при короткочасному азотуванні (до 5 год). За цей час карбіди і нітриди легуючих елементів не встигають вирости до розмірів, які б перешкоджали подальшій дифузії азоту в метал. Наявність вуглецю та легуючих елементів [126] збільшує дефекти решітки та прискорює дифузію [127]. Зміна часу азотування від 1 до 5 год призводить до збільшення глибини дифузійного шару швидкорізальної інструментальної сталі Р6М5 від 127 мкм до 210 мкм. Однак збільшення витримки до 5 год для отримання більш товстого шару супроводжується підвищенням крихкості. Крихкий шар при терті може відшаруватися; дрібні частинки, які відкололися, відіграють роль абразиву, сприяючи швидкому зносу. Тому оптимальний вибраний час експозиції становить 1 год. Загальна товщина дифузійного шару становить 127 мкм, утворюється нітридна фаза товщиною 35–40 мкм. Таке співвідношення фаз забезпечує значну продуктивність ріжучого інструменту.

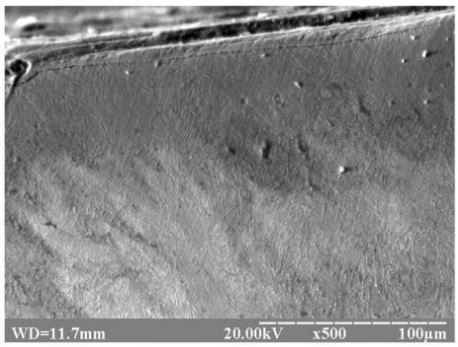


Рисунок 1.16 – Мікроструктура сталі 38ХМЮА після азотування (Т- 550 ^{0}С τ- 5 г)

Розподіл мікротвердості по глибині дифузійних шарів сталей після азотування протягом 5 годин при різних температурах показав, що висока твердість всіх сталей відповідає 450–500 ^{0}С. Однак загальна товщина азотованого шару при такій температурі є недостатньою. Підвищення температури від 450 ◦С до 700 ^{0}С значно знижує поверхневу твердість і збільшує товщину шару. Враховуючи цю продуктивність, оптимізоване співвідношення

поверхневої твердості до товщини нітридного шару [128] обрано оптимальну температуру азотування 550 ^{0}C [129]. Дослідження зміни мікротвердості від поверхні до серцевини показує, що твердість азотованого шару залежить від вмісту вуглецю та легуючих елементів. Більший вміст свідчить про більшу твердість за рахунок додаткового утворення нітридів і карбідів легуючих елементів. Дослідження впливу тривалості азотування на глибину дифузійного шару показує, що збільшення часу азотування до 5 год призводить до значного збільшення товщини шару. Однак при подальшому старінні швидкість зростання товщини шару значно сповільнюється. Після азотування зразків у контейнері проводили рентгенорадіаційний аналіз досліджуваних сталей. Дифрактограма поверхні показує наявність нітридів ξ-Fe_2N, ε-Fe_3N–Fe_2N, γ′ -Fe_4N, Fe_3N та α-Fe. Найбільша інтенсивність відповідає нітридам Fe_3N–Fe_2N, Fe_4N. У легованих сталях закріплюються нітриди і карбіди легуючих елементів. Для сталі 40Х є CrN, Mn_4N і Fe_3C; для сталі 18Х2Н4М — CrN, MoN, Mo_2N, Mn_4N, Fe_3C і Cr_7C_3. Для випадку швидкорізальної інструментальної сталі Р6М5 дифрактограма показала наявність нітридів легуючих елементів Cr_2N, W_2N, Mo_2N, VN, карбідів Fe_3C, WC, W_2C, MoC, Mo_2C, VC, V_2C, Cr_3C_2, Cr_7C_3. і $Cr_{23}C_6$, а також твердий розчин азоту в α-Fe (рис. 1.17).

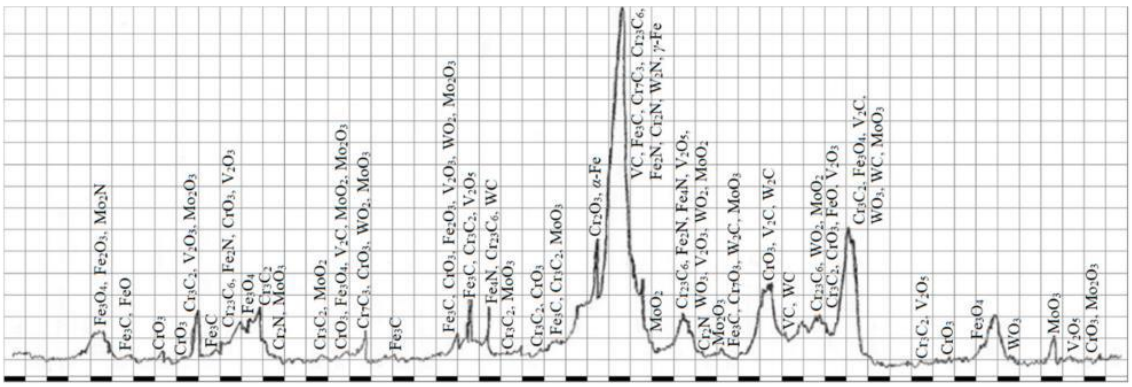


Рисунок 1.17 – Дифрактограма поверхні сталі Р6М5 після азотування (Т – 550 ^{0}C τ –1 г)

Таким чином, азотування з використанням азотозмістової речовини за розробленим оптимальним режимом призводить до 10-кратного прискорення процесу, в першу чергу за рахунок збільшення атомного номера азоту.

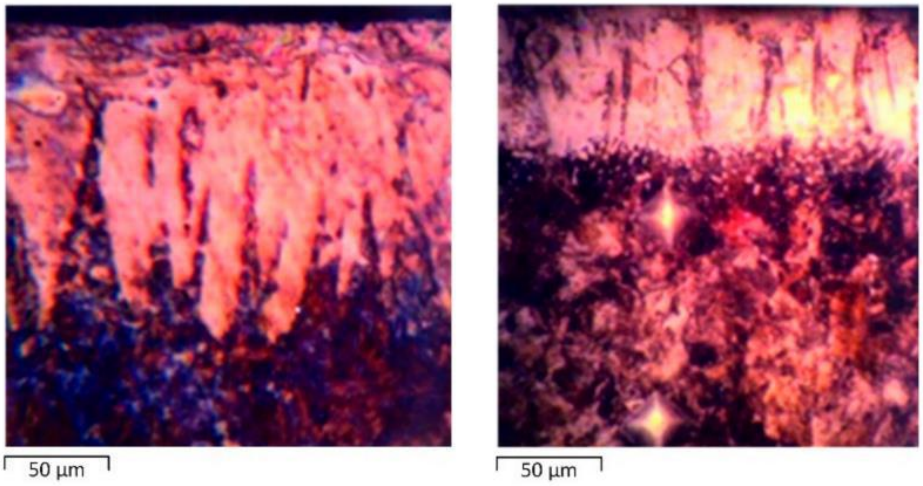
Товщина зміцненого шару та поверхнева твердість після борування сталевих виробів.

Основи розробки інструментів для зміцнення та конструкційних матеріалів дозволяють інтенсифікувати насичення виробів з атомарного бору та підвищити їх технологічність. Запропонований метод нанесення покриття – це борування в нанодисперсній речовині з активаторами. Значною перевагою є те, що це дозволяє проводити процес борування в звичайній окислювальній атмосфері без спеціального обладнання, герметизації та використання захисних атмосфер. Відомо, що температура борування може становити 800–1200 ^{0}C, залежно від марок сталі та властивостей, які необхідно отримати з боридних шарах [130, 131]. До 1100 ^{0}C утворюються голчасті бориди з твердістю 20–23 ГПа (в зоні переходу від них до основного металу). При 1100–1200 ^{0}C на поверхні сталі утворюється евтектична структура з меншою твердістю 13–16 ГПа. Для більшості конструкційних сталей температуру борування вибирають близькою до температури гартування, щоб поєднати ці дві обробки. Підвищення температури від 800 до 1000 ^{0}C збільшує товщину дифузійного шару. Однак це підвищення призводить до зростання зерен, викликаючи крихкість дифузійного шару сталі. Нижче 800 ^{0}C борування є неможливим через відносно повільну дифузію. Утворення борованого шару на першій сталі з поверхні вглиб металу проростає окремим голчастим кристалом боридів Fe_2B. Поступово ці кристали зливаються в суцільний шар. При подальшому насиченні бором утворюється ще однин шар боридів FeB. Нижче борованого шару фомується «борцементит», фазового складу $Fe_3(B,C)$, який утворюється внаслідок витіснення вуглецю з борованого поверхневого шару.

Досліджено характерну структуру для всіх сталей, крім швидкорізальних. Відповідні температури збігалися з температурою гарту для кожної сталі, оскільки поєднання борування та відпалу є найбільш раціональним. Температура гартування швидкорізальних сталей становить 1250–1280 ^{0}C, а суміщення борування із загартуванням неможливо через оплавлення поверхні внаслідок утворення евтектичної структури. Цей ефект призводить до значного зниження твердості до 13–15 ГПа. Тому борування цих сталей проводили після

загартування. Температура борування становить 1000^0C, що дозволяє отримати поверхневий шар двох боридів FeB і Fe_2B з високою поверхневою твердістю.

Мікроструктура сталей після борування протягом 2 годин показано на рис. 1.18 та 1.19.



а б

Рисунок 1.18 – Мікроструктура боридних шарів на поверхні сталі 40Х (а) і підшипниковій сталі ШХ15 (б) після борування (Т – 850 ^{0}C τ –2 г)

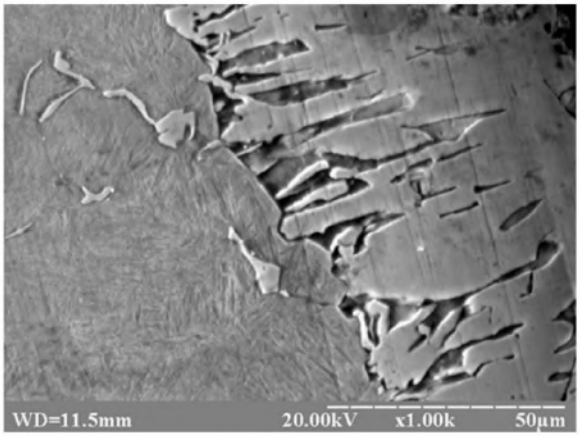


Рисунок 1.19 – Мікроструктура боридних шарів сталі 38ХМЮА після борування (Т – 950 ^{0}C τ –2 г)

З їх порівняння випливає, що, незважаючи на однакову температуру (850 ^{0}C) і час (2 години), шари відрізняються товщиною і мають деякі особливості. Таким чином, у підшипниковій сталі ШХ15 боридний шар без помітної голчастої структури. Металографічні дослідження показали, що сталь

40Х зазвичай має широкі голки, тоді як у сталі 18Х2Н4М вони набагато тонші. Є відмінності у фазовому складі. На дифрактограмі підшипникової сталі ШХ15 (рис. 1.20), крім боридів FeB і Fe_2B, присутні борид хрому (Cr_2B) і спеціальний карбід Cr_7C_3. До складу легованої сталі 18Х2Н4М входять бориди хрому CrB і Cr_2B, бориди молібдену MoB_2 і Mo_2B і цементитна фаза.

На дифрактограмі підшипникової сталі ШХ15, крім боридів FeB і Fe_2B, присутній борид хрому (Cr_2B) і спеціальний карбід Cr_7C_3. До складу легованої сталі 18Х2Н4М входять бориди хрому CrB і Cr_2B, бориди молібдену MoB_2 і Mo_2B і цементитна фаза. У швидкорізальних сталях (Р18, Р6М5) значно зменшується псування боридів клинів перед їх округленням (рис. 1.21). Цей факт пов'язаний з інгібуванням дифузії борних легуючих елементів. Ці сталі характеризуються суцільним боридним шаром і окремими округлими ділянками боридів під ним. Пошаровий рентгенофазовий аналіз підтвердив наявність боридів FeB, Fe_2B, боридів легуючих елементів Cr_2B, CrB, Cr_3B_4, Mo_2B, Mo_2B_5, MoB_2, W_2B, W_2B_5, карбідів Cr_7C_3, B_4C Fe_3C, VC і WC в дифузійному шарі.

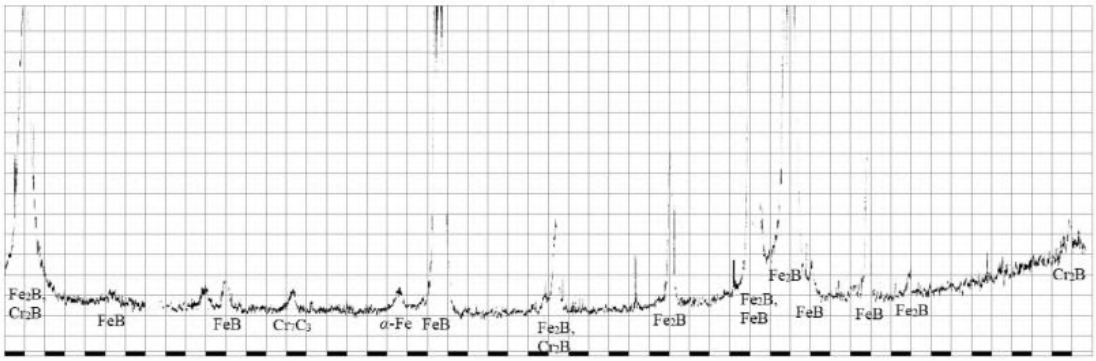
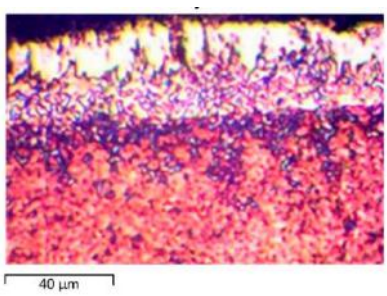
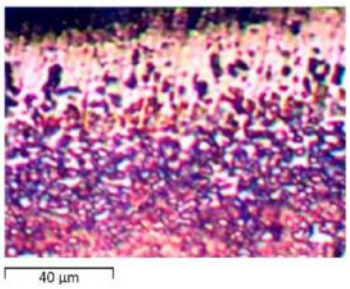


Рисунок 1.20 – Дифрактограма поверхні підшипникової сталі ШХ5 після борування (Т – 850 ^{0}С τ –2 г)



а



б

Рисунок 1.21 – Мікроструктура боридних шарів швидкорізальної сталі Р6М5 (а) і швидкорізальної сталі Р18 (б) після борування (Т – 1000 ^{0}С τ –2 г)

Згідно з експериментальними даними, залежність товщини бориду від довжини борування для різних сталей (табл. 1.6) показує, що товщина боридного шару для всіх сталей збільшується зі збільшенням тривалості процесу. Швидкість росту сильно залежить від складу сталі.

Твердість поверхневого шару також залежить від складу сталі. Однак у значно меншій мірі твердість боридів (FeB, Fe_2B), які є основними фазами поверхневих шарів за вмістом вуглецю та легуючих елементів, незначно залежить від складу сталі. Мікротвердість підтверджує наявність двох боридів FeB з твердістю 20–23 ГПа та Fe_2B — з твердістю 15–18 ГПа.

Таблиця 1.6 – Вплив тривалості борування сталевих виробів на зміну боридного шару

Сталь	Температура борування	Товщина боридних щарів, нм в залежності від тривалості борування						Поверхнева твердість (мікротвердість, ГПа)
		15 хв	30 хв	45 хв	60 хв	90 хв	120 хв	
ШХ15	850	14	31	14	54	66	73	21,4
Р6М5	1000	8	10	12	16	29	49	23
Р18	1000	3	4	6	10	22	38	23

Конструкційні вуглецеві сталі [132] характеризуються більш плавним розподілом мікротвердості в перехідній зоні, ніж в інструментальні. Поверхнева твердість конструкційної вуглецевої сталі знаходиться в межах 20-22 ГПа. Крім того, твердість поверхні становить до 21–23 ГПа для різання легованої сталі. Таким чином, з метою спрощення технологічного процесу зміцнювальної обробки всіх сталей (крім швидкорізальних) запропоновано поєднувати операцію борування з операцією зміцнення. Для них після затвердіння доцільно проводити борування при температурі 1000 ^{0}С. Тривалість борування підбирається відповідно до вимог деталей. Відповідний час для конструкційних сталей не повинен бути менше 30 хв, для вуглецевої інструментальної - 45 хв,

для високолегованих - 120 хв. Оцінка абразивної зносостійкості сталей без ХТО та після азотування та борування за розробленими технологіями показала лінійне зношування зразків.

Довговічність зносостійкості $I_{зн}$ оцінювали за допомогою швидкості зношування $I_ш$ ($I_{зн}$ = $1/I_ш$, де $I_ш$—відношення зносу I до шляху зносу L, який зношував $I_ш$ = I/L).

Дослідження показали лінійну залежність зносу від шляху тертя для всіх сталей як для азотованих, так і для борованих умов. Після борування знос значно менший, ніж після азотування [133, 134]. На випробувальному шляху 200 м величина зносу після борування в 2,1–3,6 рази (залежно від марок сталі) менша, ніж після азотування. Цей факт пояснюється насамперед значно вищою твердістю боридних шарів. Для азотованих або значно горизонтальних зразків кривих довговічність не залежить від тертя (сталь 40Х і підшипникова сталь ШХ15) або трохи знижується на початковому етапі випробувань (швидкорізальна інструментальна сталь Р6М5). Після борування всіх сталей зносостійкість значно підвищується на початковому етапі (до 120 м шляху тертя, для швидкорізальної інструментальної сталі Р6М5—80 м), а потім повільно змінюється. Експериментальні дані показали, що ріжучий інструмент, оснащений пластинами з ВК8 і Т5К10, більш стійкий до необробленої сталі ВК8 на 183 % і Т5К10 — більш ніж на 200 %. Можливе підвищення зносостійкості після азотування до 120-177 % і борування до 180-340 % в залежності від легованої сталі. Наукова новизна даного дослідження серед інших робіт полягає в наступному. Вперше теоретично визначено та експериментально встановлено зниження коефіцієнта варіації мікротвердості, стабільність та підвищення стабільності фізико-механічних властивостей твердосплавних різальних інструментів після обробки імпульсним магнітним полем. Крім того, на основі аналізу закономірностей структуроутворення дифузійних шарів встановлено, що використання нанокристалічного азотовмісного порошку дозволяє отримати необхідне співвідношення твердості поверхневого шару та його розподілу по глибині, що дозволяє збільшити зносостійкість деталей машин і інструментів, а також прискорюють процес азотування легованих сталей в порівнянні з

традиційним газовим азотуванням в десятки разів без використання спеціального обладнання. Нарешті встановлено, що запропонований новий нанодисперсний боровмісний порошок інтенсифікує дифузійні процеси, що прискорює борування під час пічного нагріву в 2–3 рази порівняно з існуючими технологіями при значному підвищенні зносостійкості деталей машин та інструментів.

Отримані результати з визначення товщини зміцненого шару та твердості поверхні після МПТ виробів зі сталі ШХ15 дозволили дослідити вплив МПТ на надійність ріжучого інструменту із твердого сплаву Т5К10 та визначити товщину зміцненого шару Твердість поверхні після азотування та борування свідчить про те, що запропоновані способи поверхневого зміцнення легованих сталей і твердих сплавів значно підвищують твердість поверхневих шарів. Цей факт дозволяє істотно збільшити термін служби інструментів і деталей машин. Після МРТ сталі ШХ15 покращується мікроструктура сплаву. Цей ефект підвищує поверхневу мікротвердість на 40–50 % порівняно з базовою (2,4 ГПа). Глибина зміцненого шару 0,08–0,10 мм. Після магнітно-імпульсної обробки розподіл мікротвердості поверхні досліджуваних твердих сплавів ВК8 і Т5К10 відносно необробленого збільшився до 17 ГПа. Коефіцієнт варіації мікротвердості зменшився з 0,13 до 0,06, а стабільність – з 0,48 до 0,27. Зміна у параметрах решітки Co і TiC після обробки сплав демонструє зменшення параметра решітки та спотворення. Це також підтверджує деформацію твердого сплаву кобальтової фази зі збільшенням міцності твердого сплаву. Стійкість різального інструменту з пластинами з ВК8 і Т5К10, оброблених методом МРТ, у відносно необробленому стані підвищується в 1,8–2,0 рази за відсутності розтріскування. Отримання таких даних підвищить зносостійкість інструменту в 2,5–3,0 рази. Слід зазначити, що підвищення стабільності ріжучих властивостей твердого сплаву пов’язане з рекристалізацією, виділенням дисперсної фази та гомогенізацією фази кобальту під дією імпульсного магнітного поля. Застосування МФТ збільшує інтенсивність переходу напружень у фазі кобальту від розтягу до стиску. Це також підвищує міцність і стабільність ріжучих властивостей інструменту. Однак ефективність розроблених технологій

азотування та борування значно скорочує тривалість обробок достатньо зміцнених шарів. Мікроструктури зміцнених шарів підтверджують класичну дифузію шарів з чітко вираженими нітридними, боридними та перехідними зонами. З іншого боку, результат знімає протиріччя між необхідністю досягнення високої продуктивності та продуктивності. Останнє стосується проблеми вдосконалення складу насичувального середовища та технологічних умов зміцнювальних обробок. Тому запропоновані способи поверхневого зміцнення є перспективними.

Примітно, що запропонований спосіб азотування, заснований на насиченні поверхні сталі атомарним азотом із дисперсного середовища в закритій ємності, не враховує такий важливий факт, як обробка великогабаритних виробів. Такий результат обумовлений розміром ємності і кількістю насиченої суміші. Збільшення розмірів ємності може змінити тиск в неоднорідності зміцненого шару. Отже, цей факт свідчить про недолік запропонованого способу. Напрямок подальших досліджень, пов’язаних з його усуненням, повинен бути зосереджений на розвитку здатності насичення суміші для великогабаритних продуктів. Таке пристосування повинно дозволити отримати рівномірний зміцнений шар деталі незалежно від розміру.

1.1.2.4 Склад, структура та властивості багатошарових покриттів Ti, Al, Cr, N, C на сталі У8А

Зростання об’єму та ефективності виробництва в металообробці супроводжується розробкою нових та розширенням області використання існуючих видів інструментів, ускладненням режимів експлуатації. Це призводить до зростання температур та навантажень в зоні контакту інструмент-заготовка і, як результат до падіння часу експлуатації виробів. Підвищення стійкості інструментів в теперішній час можливе наступним шляхом: удосконалення конструкції, розробкою нових марок сплавів, нанесенням зносостійких покриттів.

Слід зазначити, що з економічних позицій технологічних можливостей сучасних методів можна вважати, що нанесення захисних покриттів є більш перспективне ніж розробка нових інструментальних сплавів.

В теперішній час існує велика кількість способів отримання покриттів на робочих поверхнях сталевих та твердосплавних інструментів [135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142]. З урахування особливостей процесів насичення можна виділити наступні три методи: метод фізичного осадження з газової фази, метод хімічного осадження з газової фази, метод хіміко-термічної обробки, при якому формування покриттів відбувається за рахунок дифузійних процесів при твердофазному, рідинному та газофазному насиченні.

В залежності від експлуатаційних вимог методом хімічного осадження з газової фази наносять на твердосплавні пластини з механічним кріпленням багатошарові покриття за участю сполук TiN, TiC, Al_2O_3 [143, 144]. Порядок розташування шарів сполук в покритті визначає перевагу певної властивості. Слід зазначити, що формування шарів нітридів, карбідів за даною технологією відбувається за рахунок азоту, кисню насичуючого середовища. Отримана багатошарова композиція забезпечує комплекс позитивних властивостей: жаростійкість, абразивну зносостійкість, стійкість до лунко-утворення.

При використання технологій хіміко-термічної обробки джерелом азоту, вуглецю для формування відповідно шарів TiN та TiC буде основа – інструментальні сталі. Азот в сталях або твердосплавній основі може з’явитись після азотування. Результати досліджень щодо формування на інструментальних сталях та твердих сплавах дифузійних карбідних та карбонітридних покриттів наведені в роботах [146, 147], Літературні джерела щодо утворення дифузійних багатошарових покриттів TiN, TiC, Al_2O_3 на інструментальних сталях та твердих сплавах невідомі.

Якість покриття TiN на сталях можна оцінити за результатами роботи [145]. Ріжучі інструменти на основі карбіда вольфрама WC та кобальта Co впродовж десятиріч були основними компонентами твердого сплаву. В останній час зросла занепокоєність відносно токсичності кобальта. Це привело до пошуку нового матеріалу для зв’язуючої фази [146]. В той же час вимоги до підвищення

якості інструментів і продуктивності праці при металообробці зростають. В роботі [148] показано, що при осадженні TiN на залізо відбувається сильна корозія основи внаслідок формування в газовій фазі сполук $FeCl_x$. Це зумовлено протіканням обмінних реакцій між залізом і хлоридом $TiCl_4$. Можна припустити можливість утворення дифузійних покриттів без корозійного руйнування сталевої поверхні при протіканні реакцій диспропорціонування хлоридів титану і виключення реакцій з утворенням хлоридів заліза [147].

Певний інтерес викликають багатошарові багатокомпонентні покриття за участю алюмінію [147, 148, 149]. Можна припустити, що титаноалітовані, хромоалітовані покриття будуть поєднувати на поверхні вуглецевих сталей жаростійкість сполук алюмінія з твердістю карбідів, нітридів титана і хрома (TiN, TiC, Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$). Титаноалітовані покриття, отримані порошковим методом, на поверхні вуглецевих сталей складаються з шару карбіда титана TiC на зовнішній стороні дифузійної зони і шару на основі твердого розчину Feα(Al), який примика до основи. Формування останнього відбувається за рахунок дифузії алюмінію крізь шар карбіда титана, розчинення алюмінія в аустеніті і при досягненні граничної концентрації і аустеніті протікання $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ перетворення. Подібна структура формується на середньо-вуглецевих сталях при хромоалітуванні. На поверхні формується шари карбідів Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$, ближче до основи розташовані шари сполук FeAl Fe_3Al. Недоліком титаноалітованих і хромоалітованих покриттів на досліджених сталях є невдале розташування шарів в покритті, при якому в умовах контактної взаємодії композиція руйнується і не реалізує можливих властивостей за твердістю і жаростійкістю.

Працездатність композицій TiN, TiC, Al_2O_3 залежить від властивостей окремих шарів. В роботі [150] показано, що шар TiN стабільно осаджується на вибори з хорошою якістю в широкому інтервалі температур, навіть при низьких. При осадженні сполук TiC виникають труднощі, пов’язані з утворенням при насиченні гідридів вуглецю. Останні при хімічному осадженні з газової фази можуть стабільно існувати в широкому інтервалі температур і таким чином гальмувати утворення карбіду TiC. Крім того, що в шарах TiC присутні значені

зтискуючі напруження, що приводить до розшарування покриттів, відшарування покриттів від основи цілком зрозуміло.

Методика досліджень

В якості об’єкта дослідження була вибрана інструментальна сталь У8А. Титаноалітування відбувалось порошковим методом в контейнерах з плавким затвором при температурі 1050 ^{0}C , і тривалість процесу 2-4 години. В якості вихідних реагентів використовували суміші порошків наступного складу (вміст в % за масою) 40-Ti, 15-Al, 5-NH_4Cl, 40-Al_2O_3. Титанування, хромування проводили в закритому реакційному просторі в герметичних контейнерах з використанням порошків титана, хрома, чотирихлористого вуглецю [151]. Останній вводили в насичуюче середовище при температурі насичення 1050 °C. При азотуванні використана відома технологія азотування в дисоційованому аміаку (25-35 %) при температурі 540 °C впродовж 20 год. Нітрид титану TiN товщиною 5.0-5.5 мкм наносили на установці ВУ1Б з титановим катодом методом осадження з газової фази при температурах 560-600 °C впродовж 25 хвилин. Фазовий склад покриттів визначили при аналізі дифракційних піків отриманих на дифрактометрі ДРОН УМ-1 за допомогою програми «Powder Cell 2.2». Пошаровий хімічний аналіз покриттів проводили за допомогою спектрометра «Cam Scan 4D» на електронному мікроскопі «Ieol ISM – 64 OLV». Мікроструктуру визначили на світловому мікроскопі Neophot 7, мікротвердість – на приладі ПМТ 3.

Експериментальні результати

Результати досліджень фазового та хімічного складів, структури, властивостей досліджених в роботі покриттів на сталі У8А наведені в табл. 1.7 та 1.8 і на рис. 1.22.

Фазовий, хімічний склад сталі У8А перед титаноалітуванням будуть впливати на будову та властивості комплексних покриттів. В роботі запропонована титаноалітування сталі У8А з попередніми: азотуванням, нанесенням шару TiN методом фізичного осадження з газової фази, дифузійним хромуванням.

Таблиця 1.7 – Хімічний склад сталі У8А

№	Вміст хімічних елементів, % мас								
1	C	Si	Mn	Cr	S	P	Cu	Ni	Fe
2	0.81	0.26	0.20	0.20	0.018	0.025	0.20	0.20	залишок

При дифузійному титануванні, хромуванні сталі У8А формуються шари на основі відповідно карбіда титана TiC та карбідів хрома Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$, які примикають безпосередньо до основи. Формування карбідів відбувається при взаємодії адсорбованих титана або хрому з екстрагованим до поверхні вуглецем.

Таблиця 1.8 – Фазовий склад та характеристика покриттів на сталі У8А (зона сполук)

Покриття №	Вид обробки Температура °С час година	Фазовий склад	Період гратки, НМ	Товщина покриття мкм	Мікро-твердість
1	Титаноалітування дифузійне 1050, 3	FeTi Fe_2Ti TiC	a=0,2971 a=0,4708 c=0,7701 a=0,4328	1,0-1,5 1,5-2,0 16,0	6,0 8,1 37,8
2	Хромування дифузійне 1050, 4	FeCr $Cr_{23}C_6$ Cr_7C_3	a=0.8810 c=0.5446 a=1,0658 a=0,4528 b=0,7012 c=1,2144	3,5 6,0 9,0	6.5-7.0 16,5 17,2
3	Ti Фізичне осадження з газової фази	TiN	a=0,4239	5,5-6,0	19,8
4	Азотування в аміаку, 540, 16	Fe_2N Fe_4N	a=0,4799 a=0,4419 c=0,3796	11,0 6,5	5,6 7,4
5	Титаноалітування (дифузійне) 1050; 4 Ti(40%) Al(5%) NH_4Cl(5%) Al_2O_3(40%)	$Fe_2(Ti,Al)_4O$ TiC $Fe_\alpha(Al)$	a=1,1309 a=0,4330 a=0,2800	8,0 5,0-5,5 35,0	8,0 34,5 2,0-2,9
6	Титаноалітування Сталі У8А	$Fe_2(Ti,Al)_4O$ TiC TiN	a=1,1295 a=0,4329 a=0,4240	10,0 6,9 5,0	11,1 30,3 22,0
7	Титаноалітування сталі У8А з шаром TiN	$Fe_2(Ti,Al)_4O$ TiC TiN	a=1,1293 a=0,4304 a=0,4240	10,0 6,9 5,0	11,1 30,3 22,0
8	Титаноалітування хромованої сталі У8А	AlCrTi Cr_2Ti Ti_3Al	a=0,5000 a=0,6954 a=0,5650 b=0,5650	2,0 11,0 3,5	- 6,1-7,0 -

		TiC $Cr_{23}C_6$ Cr_7C_3	c=0,4652 a=0,4321 a=1,0711 a=0,6890 b=1,2421 c=0,4532	7,0 5,5 4,5	35,5 16,0 16,5

Титановані покриття на сталі У8А складаються, як вже зазначили, з шару карбіда титана з періодом кристалічної гратки близьким до стехіометричного, шарів інтерметалідів Fe_2Ti, FeTi, а також перехідної зони з підвищеним вмістом титана (табл.1.8). Шар TiC складається по всій товщині з рівновісних зерен розміром 0.5 -0.7 мкм. Злам TiC транскристалічний, пори в структурі не виявлені (рис. 1.22).

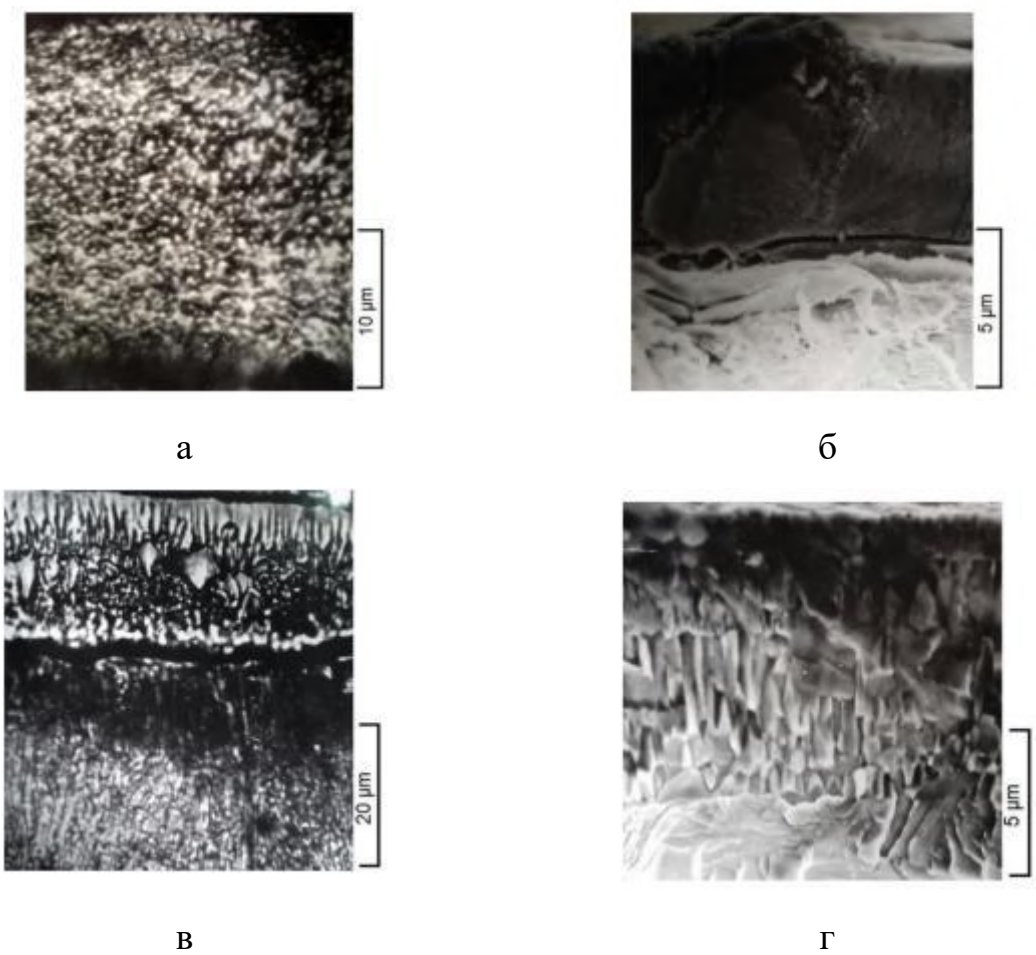
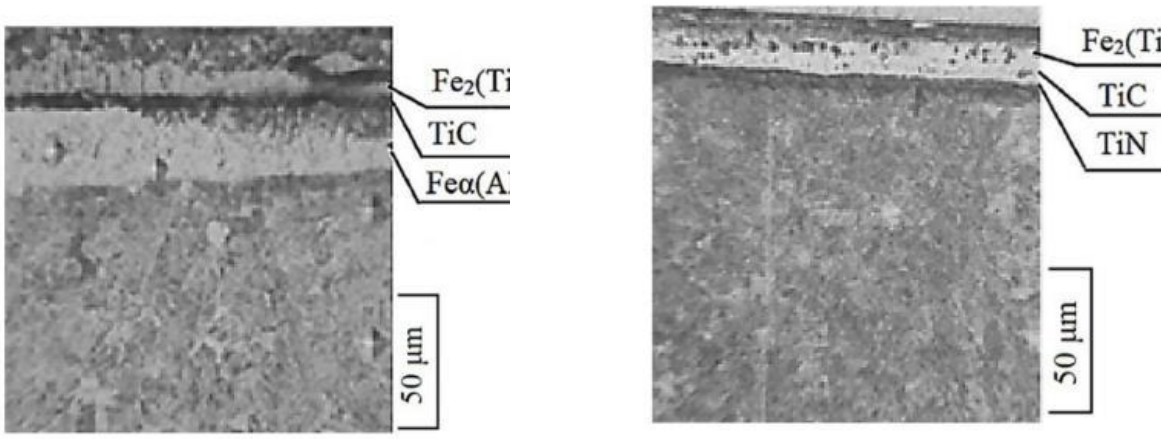


Рисунок 1.22 – Мікроструктури титанового (а, б) та хромового (в, г) покриттів на сталі У8А: (а, в) металографічний мікроскоп; (а) ×1400, (в) ×800; а) травлення розчином Муракамі; (б. г) растровий мікроскоп, злами

Присутність зовнішнього шару інтерметаліду (σ-фаза) і перехідної зони характерна для хромових покриттів. При цьому шари карбідів Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$ в світловому мікроскопі та растровому мікроскопі виявляється із стовбчатою будовою (рис. 1.23).



а б

Рисунок 1.23 – Мікроструктури титаноалітованого покриттів на сталі У8А; (а, б) металографічний мікроскоп;×300; (б) шар TiN, нанесений на сталь У8А перед титаноалітуванням; титаноалітування (1050 ^{0}C, 4 год)

На частину зразків перед титаноалітуванням наносили методом фізичного осадженим з газової фази нітрид титану TiN товщиною 4.5 – 5.0 мкм. В світлому мікроскопі шар сполуки TiN жовтуватий колір, що відповідає складу нітрида близького до стехіометричного. Останнє підтверджується рентгенофазовим аналізом, відповідно до якого період ГЦК гратки сполуки TiN становить 0,4245 нм (табл. 1.8)

Азотування відбувалось в атмосфері аміаку при рівні його дисоціації 25-35 % при температурі 540 °C впродовж 20 годин. На поверхні сталі У8А утворюється дифузійний шар, який складається із зони сполук: це шари фаз Fe_4N, $Fe_{2\text{-}3}N$, а також зони внутрішнього азотування (табл. 1.8). Остання в перлітній структурі сталі У8А практично не виявляється.

Титаноалітованні покриття, які утворилися при одночасному насиченні титаном та алюмінієм в порошковій суміші, складаються з твердого розчину $Fe_\alpha(Al)$ на границі з основою, шару TiC та шару $Fe_2(Al,Ti)_4O$ на зовнішній

стороні. При хіміко-термічній обробці внаслідок дифузії алюмінію в аустеніті при досягненні граничної концентрації (0,5 % має при температурі 1050°С відбувається $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ перетворення. Внаслідок незначної розчинності вуглецю в фериті відбувається відтіснення вуглецю від поверхні табл. 1.8.

Після травлення 3% спиртовим розчином азотної кислоти шар Fe_α(Al) виявляється у вигляді світлої зони з характерними стовпчастими кристалами (рис. 1.23). Слід зазначити, що в шарі практично Fe_α(Al) відсутній титан як на певній відстані від шару TiC, так і безпосередньо за границею шарів TiC − Feα(Al).

Відсутність титана зумовлена взаємодію його на поверхні з вуглецем основи і утворенням шару на основі карбіда TiC. В свою чергу алюміній за прийнятних умов ХТО карбідів в дифузійній зоні не утворю, а дифундує крізь шар TiC в основу, де формується шар Fe_α(Al). Концентрація алюмінію на поверхні титаноалітованої сталі У8А та в твердому розчині Feα(Al) становить відповідно 19,8 та 7,5 – 8,5 % мас.

Загальною ознакою багатошарових покриттів, отриманих поєднанням методів азотування, фізичного осадження з газової фази, дифузійного хромування з титаноалітуванням є наявність в отриманих таким чином покриття шару сполук TiC (покриття 6-8 табл. 1.8). Формування карбіда TiC в даних покриттях відбувається за рахунок дифузії вуглецю з основи і взаємодії на поверхні з титаном. Товщина шарів TiC в покриттях 6-8 (табл. 1.8) менша за товщину шару TiC в покритті 1 (табл. 1.8), що зумовлена наявністю в покриттях 6-8 (табл. 1.8) проміжної зони з бар’єрними функціями: це шари TiC в покриттях 6,7 (табл. 1.8) , шари Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$ в покритті 8 (табл. 1.8). Шар TiN В покритті 6 (табл. 1.8) починає утворюватися на початкових етапах титаноалітування і його бар’єрні властивості зростають із збільшенням товщини, що зумовлює дещо більшу товщину шару TiC в порівнянні з товщиною шару TiC в покритті 7 (табл. 1.8).

Відмінністю фазового складу покриттів №6-8 (табл. 1.8) від титаноалітованих №5 (табл. 1.8) є відсутність шару Fe(Al). Це зумовлено присутністю бар’єрних шарів TiN в покриттях №6,7 (табл. 1.8), шарів Cr_7C_3,

$Cr_{23}C_6$ в покритті №8 (табл. 1.8) які повністю припиняють проникнення алюмінію в сталеву основу. Шар $Fe_{\alpha}(Al)$ в даних покриття після титаноалітування не виявлено. При цьому в покриттях №6,7 (табл. 1.8) вуглець та залізо з основи до поверхні дифундують крізь шари TiN, TiC.

Аналіз отриманих даних показав вплив татаноалітування на фазовий склад азотованих та хромованих шарів. Практично без змін залишається після титаноалітування шар TiN. На азотованій сталі зникають шари сполук Fe_4N, Fe_3N, Fe_3O_4, змінюється склад зони внутрішнього азотування. В хромованому покритті з карбідів Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$ та σ-фази відбуваються наступні зміни: зменшується загальна товщина шару карбідів з 15,0 до 10,0 мкм в основному за рахунок товщини шару Cr_7C_3; зникає шар σ-фази.

Наведенні результати досліджень дають можливість вважати, що джерелом вуглецю для утворення TiC є вуглець карбідів хрома, а не вуглець основи. Таким чином, формування шару TiC відбувається при дисоціації карбідів хрома. Звільнений таким чином вуглець дифундує до поверхні і приймає участь в утворенні шару TiC. Хром та залізо разом з насичуючої елементами титаном та алюмінієм формують сполуки зовнішніх шарів: AlCrTi, Cr_2Ti, Ti_3Al.

Періоди кристалічних граток карбіда титана TiC, нітрида титана TiN відповідають сполукам, які близькі по складу до стехіометричних [152, 153]. Відомо [156], що період кристалічної гратки TiN збільшується при зростанні вмісту азоту в області гомогенності, яка змінюється при 1400 °C від TiN 0,6 до TiN 1,0. В роботі встановлено, що період гратки фази проникнення TiN отриманої методом фізичного осадження на сталі У8А практично не змінився після наступного титаноалітування і виявився вищим за період гратки TiN утвореної після титаноалітування азотованої сталі. Останнє може свідчити про недостатню потужність джерела азоту (азотованої сталі).

При цьому період гратки шару TiC на азотованій сталі (покриття №6 табл. 1.8) виявився більшим період гратки TiC на сталі з шаром TiN (покриття №7 табл. 1.8). Встановлену залежність можна пояснити гальмуванням потоку вуглецю з основи до поверхні шаром TiN і відсутність такого шару на зразках з покриттям №6 (табл. 1.8) впродовж всього процесу.

Аналіз результатів досліджень фазового складу показав, що шари TiC, TiN в покриттях 1,5-8 (табл. 1.8) утворюються при екстракції титаном вуглецю, азоту до поверхні з утворенням фаз проникнення. Наявність в покриттях шару TiN, який виконує роль бар'єра для алюмінія, попереджає утворення шару Fe_{α}(Al). Крім того, при титаноалітуванні можливе легування шарів TiC, TiN залізом, хромом, які при дифузії до поверхні проходять крізь ці шари.

Так концентрація алюмінію, заліза в шарі TiC при звичайному титаноалітуванні (покр. №5 табл. 1.8) знаходяться на рівні 0,2 % та має 2,4 – 4,6 % мас. В той же час вміст алюмінію на зовнішній стороні покриттів 5-8 (табл. 1.8) становить 18,5 – 19,8 % мас. заліза 20,0 – 38,0 % мас.. Титаноалітування азотованої сталі з шаром TiN приводить до зростання в шарі TiC вмісту алюмінію до 0,5 – 0,6 % мас. та зменшення вмісту заліза до 1,1 % мас. При цьому вміст алюмінію в шарі TiN досягає 1,3 – 1,4 % мас. заліза – 2,3 – 2,4 % мас.

На рис. 1.24 наведені результати досліджень розподілу насичуючих елементів та елементів основи за товщиною титаноалітованих покриттів на азотованій сталі У8А та карта розподілу. Як вже зазначали основною відмінність покриттів 5 від покриттів 6-8 (табл. 1.11) є відсутність в покриттях 6-8 (табл. 1.11) шару Fe_{α}(Al). Встановлена особливість будови покриттів 6-8 зумовлена присутністю бар'єрних шарів, дія яких полягає в гальмуванні проникнення алюмінію в основу і попереджує утворення шару Fe_{α}(Al).

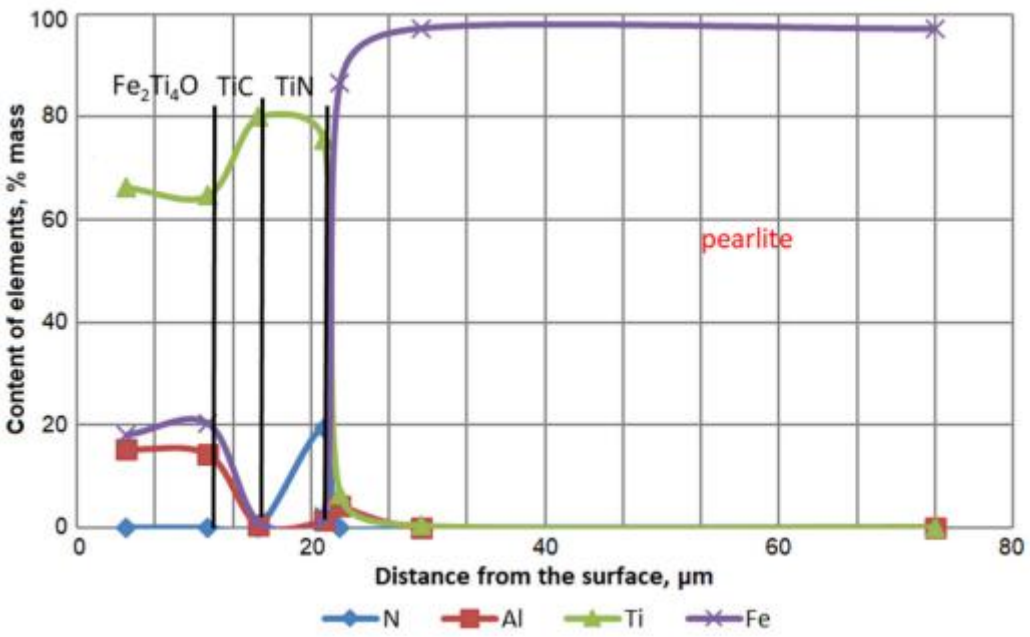
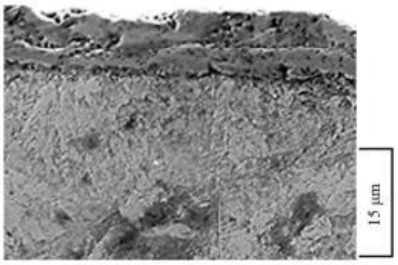


Рисунок 1.24 – Розподіл насичуючих елементів та елементів основи за товщиною титаноалітованих покриттів на азотованій сталі У8А

В шарі $Fe_2(Ti,Al)_4O$ виявлена значна кількість азоту, джерелом азоту можуть бути в зразках №6 (табл. 1.8) залишки азоту в сталі після титаноалітування, нітрид титана, в зразках №7 (табл. 1.8) – нітрид титана. Азот нітрида титана дифундує до поверхні і розчиняється в шарі $Fe_2(Ti,Al)_4O$. Розчинність нітрида титана в Fe_2Ti_4O була показана в роботі [154], в якій в якості бар'єра шару була використана сполука (Ti, Zr)N. Вірогідно, в рівновазі з шаром TiC повинна знаходитись сполука з певним вмістом азоту. Таким чином при ХТО відбувається дисоціація шару TiN з наступною дифузією азота і титана в шар Fe_2Ti_4O.



а

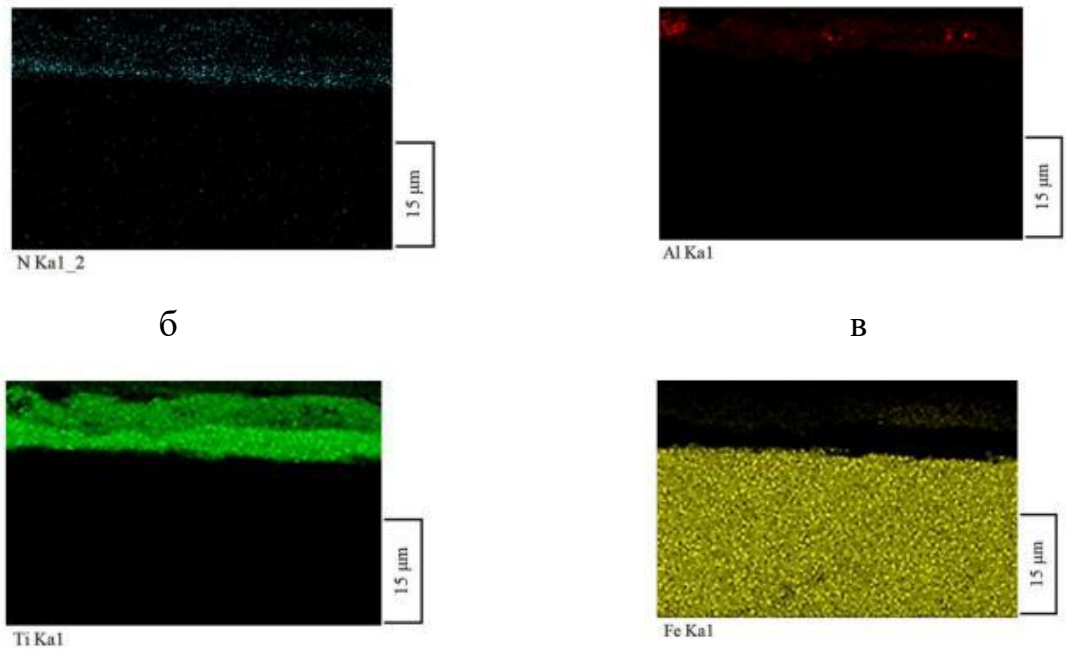


Рисунок 1.25 – Мікроструктура сталі У8А (а) та розподіл азоту (б), алюмінію (в), титану (г), заліза (д) в структурі сталі після титаноалітування азотованої сталі: азотування (540 ^{0}С, 36 год), титаноалітування (1050 ^{0}С, 4 год)

На рис. 1.24 наведені результати досліджень розподілу елементів за товщиною покриття №5 (табл. 1.8), Покриття отримані шляхом дифузійного титаноалітування хромованої сталі. Відповідно до отриманих результатів в покритті № 8 (табл. 1.8) при титаноалітуванні відбувається дисоціація карбідів хрому, що підтверджується зменшенням товщини їх шарів. Звільнений з карбідів хрому вуглець взаємодіє з титаном з утворенням карбіду ТС, а хром – інтерметалідів. Товщина шару ТіС в покритті №8 (табл. 1.8) становить 7,0 мкм.

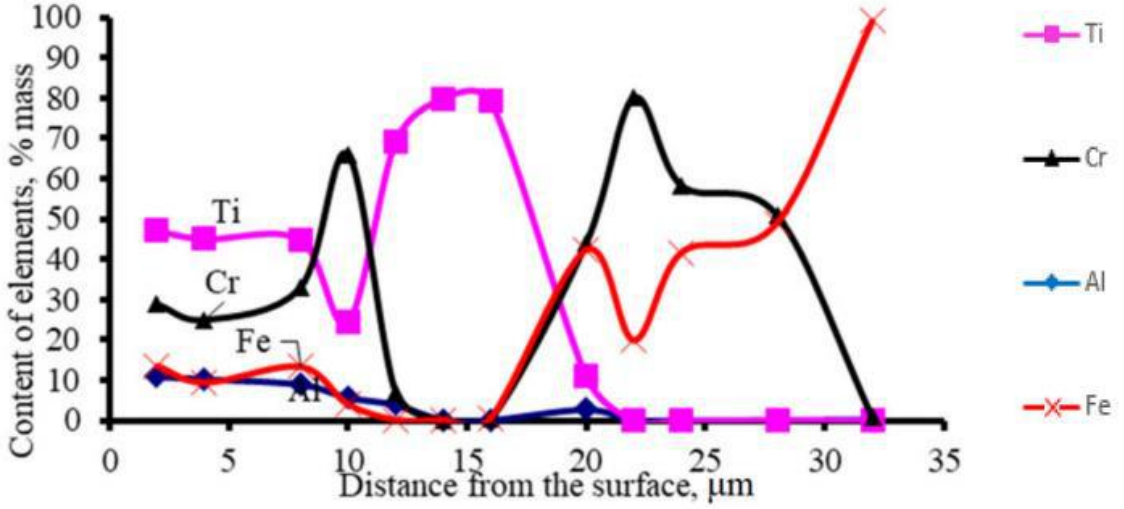


Рисунок 1.26 – Розподіл елементів за товщиною покриття на сталі У8А з шаром σ- фази; Cr_7C_3 і $Cr_{23}C_6$ після титаноалітування хромованої сталі: хромування (1050 ^{0}C, 4 год); титаноалітування (1050 ^{0}C, 4 години)

Металографічний аналіз отриманих покриттів показав суттєву відмінність комплексних покриттів з шарами нітрида титана TiN та карбідів хрома (покриття 6-8, табл. 1.8). В першу чергу це стосується відсутності і комплексних покриттях шару Fe_α(Al). Безпосередньо до основи в покриттях 0,7 (табл. 1.8) примикає шар TiN або шар карбідів хрому в покритті №8 (табл. 1.8). Зовні розташований шар карбіда титана TiC та шар $Fe_2(Ti,Al)_4O$ в покриттях №6,7 (табл. 1.8), або шар TiC та шари інтерметалідів в покритті №8 (табл. 1.8).

Слід зазначити, що шар нітрида TiN добре ідентифікується в структурі при аналізі і світловому мікроскопі завдяки жовто-золотавому кольору.

Мікротвердість окремих складових покриттів змінюється в широкому інтервалі: від мікротвердості шарів карбіда TiC – 30,3 – 37,8 ГПа, нітрида TiN – 19,8 – 22,0 ГПа карбідів Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$ – 16,5 – 17,2 ГПа, до мікротвердості інтерметалідів, оксидів – 6,1 – 14,0 ГПа. Мікротвердість зовнішніх шарів в покриттях з TiN (№6,7, табл. 1.8) в порівнянням з мікротвердістю подібних шарів в покриттях в покритті №5 виявилось вищою. Це пов’язано, як вже зазначили, з легування цих зон в покриттях №6,7 (табл. 1.8) азотом.

Аналіз результатів випробувань досліджених в роботі покриттів показав, що жаростійкість сталі У8А з покриттями зросла в 4,2 – 8,5 разів. Максимальну

жаростійкість показали покриття №8 (табл. 1.8) отримані при титаноалітуванні хромованої сталі. Аналіз літературних джерел [155, 156], що при підвищених температурах в умовах безперервного окислення сплавів Ti – Al – Cr на поверхні формується оксидна плівка $(Al, Cr)_2O_3$ в високим опором до окислення. Відомо [158, 159], що властивості покриттів зі участю титана на алюмінію при високих температурах, в умовах тертя козання залежить від наявності на зовнішній стороні шару сполуки Al_2O_3. Цілком зрозуміло, що підвищення жаростійкості покриттів за участю титана і алюмінію є важливою задачею. Жаростійкість сплавів титана і алюмінію залежить від складу і зростає при збільшенні вмісту алюмінію до 60-70 % мас. При цьому бінарний сплав Ti-Al при значному вмісті алюмінію стає крихким, що обмежує їх практичне використання. Вирішення цієї проблеми стає можливим при використанні хрома як легуючої добавки. Сплави Ti-Al-Cr, які складаються з фази Лавеса $Ti(Al,Cr)_2$ та θ-фази $(Ti_{0,25}Al_{0,67}Cr_{0,08})$ відзначаються високою жаростійкістю та механічними властивостями [158, 159]. В першу чергу це сплав, який містить 25-35 % фази Лавеса та 70-75 % має θ-фази.

Відомо [157, 158, 159], що окислення сполук за участю титана та алюмінію відбувається з утворенням окисної зони, фазовий склад якої залежить від вмісту алюмінію в покритті і температурі. В плівках Ti_x Al_x N [24] вміст алюмінію змінювали від 25,0 до 67,0 % мас. Жаростійкість в даному випадку зростала. Окислення плівочних агрегатів TiAlN при температурах 700 °C та та нижчих супроводжується формуванням гетернної зони оксидів іх сполук Al_2O_3 , TiO_2. При температурах вищих за 800 °C жаростійкість зростає, формується двошарова оксидна структура із сполук Al_2O_3 – зовнішній шар, та TiO_2 – внутрішній. Важають, що основні захисні функції виконує шар Al_2O_3.

Ресурс жаростійкості матеріалу покриття визначається запасом алюмінію. Чим більший вміст алюмінію тим довший термін служби покриття. При випробуванні частина алюмінію покриття утворює оксидну плівку Al_2O_3, частина дифундує в основу. Крім того, можлива дифузія елементів основи в покритті, що також зменшує концентрацію, алюмінію. Як показали отримані рузультати бар’єрний шар TiN практично повністю перекриває дифузію

алюмінію до основи. В роботі [162] показано, що кількусть алюмінію перенесена з покриття в основу така сама як покриття в оксид Al_2O_3.

Аналіз результатів досліджень зносостійкості сталі У8А з багатокомпонентими покриттями в умовах тертя ковзання без змащування для прийнятої в роботі швидкості ковзання (10 м/с) та навантаження (5.0 : 10.0 : 15.0 Н) показав доцільність використання розроблених покриттів для захисту інструментів. Саму високу зносостійкість показали титаноалітовані покриття з попередньо нанесеними шарами карбідів хрома, нітрида титана, азотовані.

Відомо [160, 161], що при терті ковзання на контактних поверхнях твердих тіл при повному тиску виникають на невеликих ділянках так звані плями контакту. Сумарна площа плям контакту відповідає дійсній площі контакту яка становить незначну частину від номінальної. В процесі тертя форма та положення плям контакту постійно змінюється. Дослідженями встановлено [164], що середній діаметр плям контакту становить 6.0 – 30.0 мкм при відстані між ними 80.0 – 120.0 мкм.

Використана в роботі методика випробувань за схемою вал – вкладка дозволяє аналізувати безпосередньо пляму контакту за утвореною лункою зносу. Знос в процесі тертя можна оцінювати за зміною маси зразка або за зміною геометричних параметрів лунки.

Слід зазначити, що позитивно впливають на зносостійкість дослідженої в роботі сталі окремі властивості та характеристики покриттів. Реальні умови роботи різального інструменту складні, одночасно протікає ряд фізичних та хімічних процесів, які приводять до руйнування виробу. В роботі розглянуто деякі процеси, які пов’язані із впливом на зносостійкість покриттів з бар’єрним шаром на основі нітрида титана TiN.

Температура в зоні контактної взаємодії при різанні може досягати великих значень, що супроводжується взаємодією елементів покриття і основи з оточуючим середовищем. Сформовані оксидні плівки, які гарно зчеплені з основою і мають антифракційні властивості, підвищують зносостійкість інструментів.

Формування оксидів необхідного складу можлива лише на сплаві певного складу. Відомо, що на зносостійкість багатокомпонентних покриттів позитивно впливають шари оксида алюмінія Al_2O_3 та оксида титана TiO_2. Шар оксиду алюмінія Al_2O_3 був зафіксований на поверхні покриття після ХТО, частково формувався в процесі тертя. Шар оксиду TiO_2 формується як відомо, в процесі випробувань при підвищених температурах. Можна вважати, що наявність в покритті бар'єрного шару на основі нітрида титана TiN стабілізує хімічний склад за рахунок гальмування дифузійного відводу в основу елементів покриття, в першу чергу алюмінію. Крім того, бар'єрні шари гальмують дифузію елементів покриття в оброблюваний сплав, а елементів оброблюваного сплава (контртіла) в покриття.

Властивості покриттів, їх будова, сформовані при терті шари оксидів алюмінія та титана зумовлюють зниження коефіцієнтів тертя сталі У8А з покриттями в контакті з контртілом і таким чином сприяють зростанню зносостійкості. Коефіцієнт тертя визначали в умовах сформованої лунки зносу, що в значній мірі відповідає реальним умовам експлуатації різальних інструментів. Аналіз літературних джерел [162, 163] показав вплив покриттів на коефіцієнт тертя при випробуваннях в умовах тертя ковзання без змащування за схемою штіфт-диск. Встановлено, що покриття нітрида титана TiN при терті зі сталлю сприяють зниженню коефіцієнта тертя в порівнянні з коефієнтом тертя сталевої пари в 2.1 рази. В цій же роботі [164] показано, що покриття TiN зменшують коефіцієнт тертя в незначній мірі, а покриття карбідів хрома навіть збільшують.

В умовах тертя прийнятих в роботі, в зоні контакту формується лунка з глибиною більшою за товщину покриття. Таким чином, края лунки будуть складатися з шарів TiN, TiC, інтерметалідів, оксиди Al_2O_3 , TiO_2. Центральна зона лунки відповідає матеріалу основи з можливими включеннями зруйнованого покриття – частками TiN, Tic, що відповідає структурі Шарпі.

Запропоновані комплексні покриття за своїми будовою, властивостями можуть бути використаними для підвищення експлуатаційних властивостей інструментів із сталі У8А.

1.1.3 Технологічні процеси складання виробів

1.1.3.1 Захоплювальний пристрій для деталей типу вилки

Для переміщення деталей типу вилки промисловими роботами найчастіше використовують паралельні захоплювальні пристрої з неперелагоджуваними пальцями, наприклад, як захоплювальний пристрій Robotiq Hand-E [165]. Дані рішення мають суттєвий недолік, а саме відсутність гнучкості. Дані захоплювальні пристрої можуть захоплювати деталі за поверхні тільки певної конфігурації, та існує обмеження щодо величини переміщення пальців, що вимагає виготовлення комплекту нових пальців під деталі різних конфігурацій. Через це виникають додаткові обмеження для конструкцій додаткового обладнання, таких як живильні пристрої, та технологічного процесу.

Найбільш близьким за технічною суттю до запропонованої моделі, вибраний як прототип, є паралельний захоплювальний пристрій [166, стор. 103], що складається із силового, передавального та затискного механізмів. Силовим механізмом виступає пневматичний циліндр двосторонньої дії, передавальним механізмом – клинова передача, а затискним механізмом – непереналагоджувані пальці. Недоліком цього захоплювального пристрою є те, що конструкція пальців не є гнучкою.

В основу моделі поставлена задача створити захоплювальний пристрій з можливістю захоплювати деталі типу вилок за циліндричну поверхню бобишок або за плоскі поверхні з можливістю переналагодження захоплювального пристрою для широкої номенклатури деталей. Також корисна модель повинна швидко та надійно фіксувати деталь та мати модульну конструкцію для можливості модернізації.

Поставлена задача вирішується тим, що у захоплювальному пристрої для деталей типу вилки, який містить пневматичний циліндр з інтегрованою клиновою передачею та встановлений на ній затискний механізм. Згідно корисної моделі, затискний механізм складається з пари основ пальців, які з’єднані з клиновою передачею, при чому, кожна з основ пальців має дві базуючі поверхні, на які встановлені рухомі пальці з м’якими накладками на їх робочих поверхнях.

У запропонованій конструкції захоплювального пристрою з метою переналагодження для широкої номенклатури деталей затискний механізм складається з пари основ пальців, при чому кожна з основ пальців має дві базуючі поверхні у вигляді зубців для встановлення рухомих пальців, при цьому можна змінювати відстань між протилежними рухомими пальцями з кроком, який дорівнює двом крокам зубців основи пальців, при чому крок зубців основи пальців дорівнює кроку зубців рухомих пальців. Рухомі пальці з м’якими накладками можуть бути виконані як з плоскими робочими поверхнями для захоплення деталей за плоскі поверхні, так і з призматичними робочими поверхнями для захоплення деталей за циліндричну поверхню бобишок. Встановлені на рухомих пальцях м’які накладки підвищують надійність фіксації деталі захоплювальним пристроєм. Конструкція захоплювального пристрою дозволяє промисловому роботу з встановленим захоплювальним пристроєм, обслуговувати одночасно два верстати з різними типорозмірами деталей або технологічними операціями, що сприяє скороченню витрат часу на підготовку виробництва.

Суть запропонованої моделі пояснюється кресленнями, де:

на рис. 1.27 зображено тривимірну модель захоплювального пристрою;

на рис. 1.28 зображені конструктивні елементи захоплювального пристрою;

на рис. 1.29 зображений розріз А – А захоплювального пристрою;

на рис. 1.30 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо переміщувати даним захоплювальним пристроєм, для переміщення вилки з мінімальними розмірами;

на рис. 1.31 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо переміщувати даним захоплювальним пристроєм для переміщення вилки з максимальними розмірами.

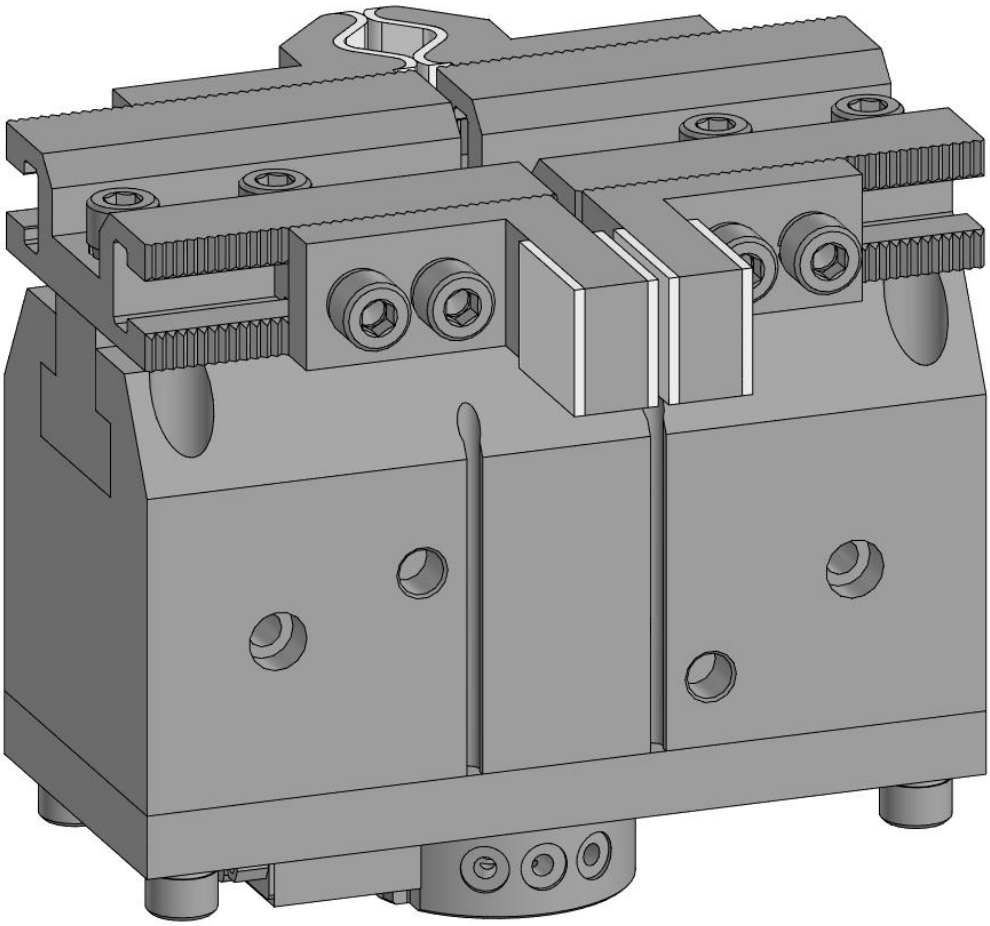


Рисунок 1.27 – Захоплювальний пристрій для деталей типу вилки

Запропонована конструкція захоплювального пристрою для деталей типу вилки складається з пневматичного циліндру 1 з інтегрованою клиновою передачею (не показана), який з’єднаний з перехідною плитою 2. Перехідна плита 2 з’єднана з адаптером 3 для можливості заміни захоплювального пристрою. На рухомі елементи 4 клинового механізму встановлений затискний механізм 5, який складається з пари основ пальців 6, закріплених за допомогою гвинтів 7 до рухомих елементів 4 клинової передачі. Кожна основа пальців 6 з обох сторін має базуючі поверхні 8, які виконані у вигляді зубців. На кожну пару протилежних базуючих поверхонь 8 в парі основ пальців 6 базується пара плоских рухомих пальців 9, або призматичних рухомих пальців 10 за допомогою зубчатого зчеплення, при чому крок зубців основи пальців дорівнює кроку зубців рухомих пальців. Рухомі пальці 9, 10 фіксуються до основ пальців 6 за допомогою гвинтів 11 з пружними шайбами 12 та сухарями 13. Для компенсації помилки позиціонування на рухомі пальці 9, 10 встановлені м’які накладки 14

для плоских рухомих пальців 9 з плоскою поверхнею 17 та м’які накладки 15 для призматичних рухомих пальців 10 з призматичною поверхнею 16. При цьому м’які накладки 14, 15 характеризуються пружною деформацією (наприклад, які виготовлені з гуми, але остаточний вибір матеріалу залежить від конкретних виробничих умов).

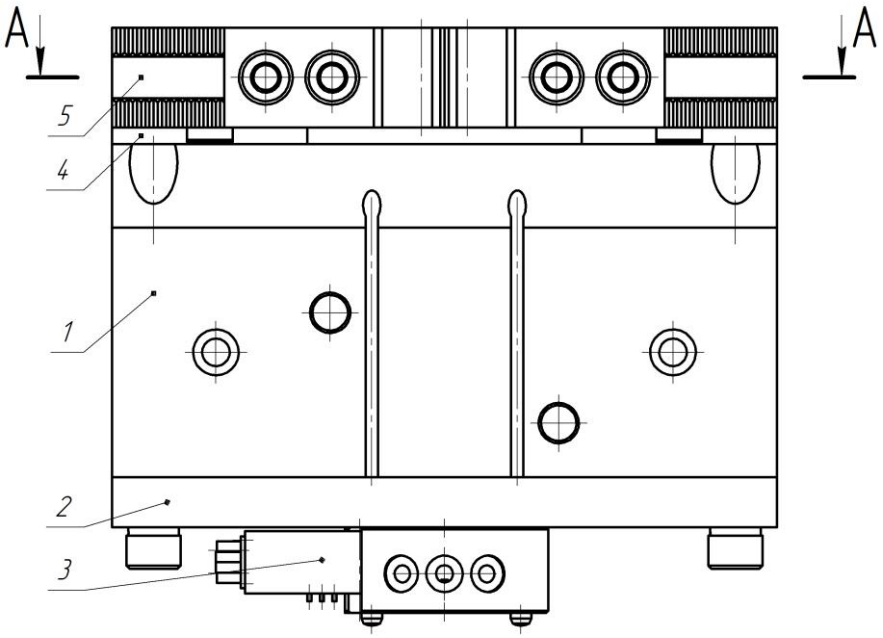


Рисунок 1.28 – Захоплювальний пристрій для деталей типу вилки. Конструктивні елементи

Мінімальний діаметр бобишки при захопленні деталі за циліндричну поверхню D_{min}, мм, становить:

$$D_{min} = 0,7 \cdot L_{ff\,min} + 2 \cdot L_{sft};$$

де $L_{ff\,min}$ – відстань між точками, що утворені перетином площин, що утворюють робочу поверхню призматичних рухомих пальців при мінімальній відстані між рухомими елементами клинового механізму, мм;

L_{sft} – додаткова відстань, що гарантує затискання деталі, мм.

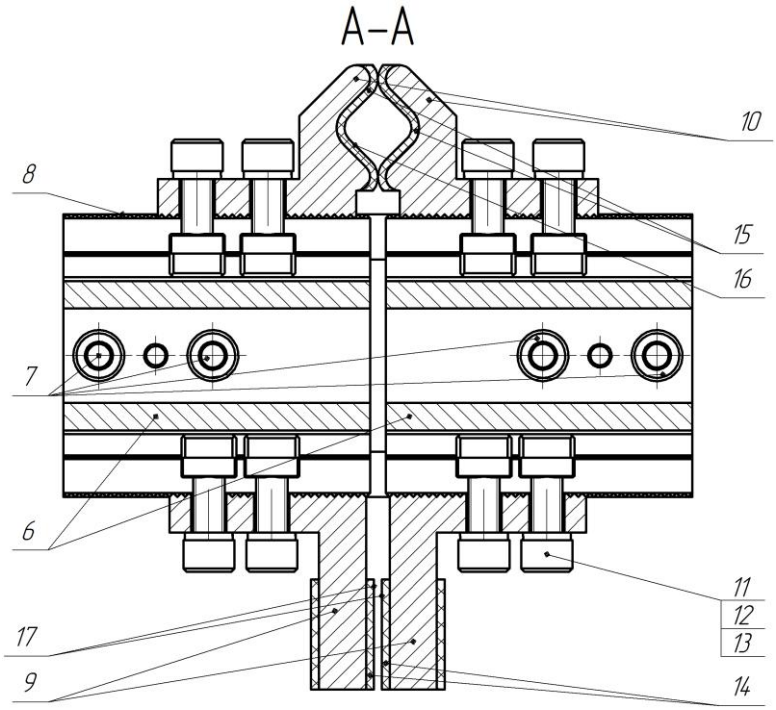


Рисунок 1.29 – Розріз А – А захоплювального пристрою

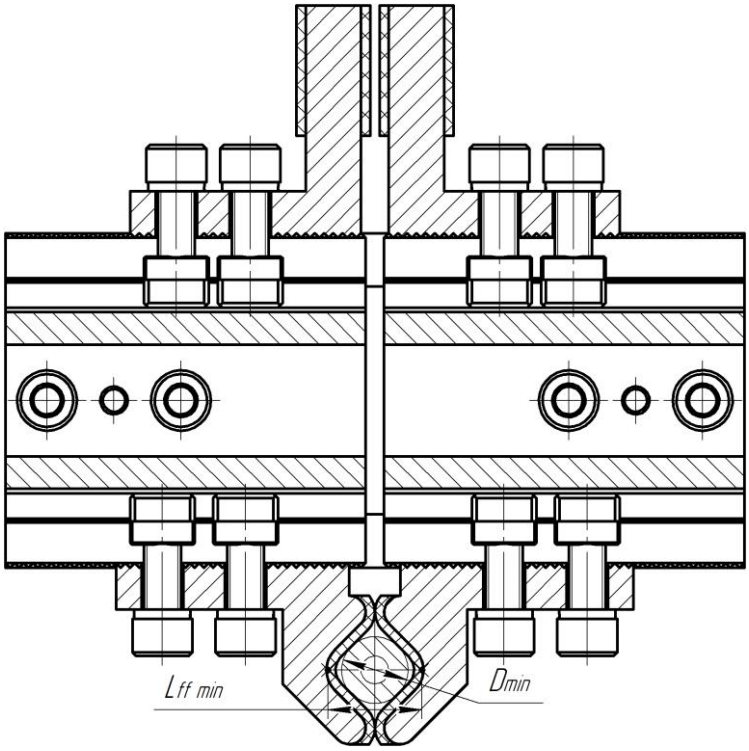


Рисунок 1.30 – Граничні габаритні розміри деталей, які можливо переміщувати даним захоплювальним пристроєм, для переміщення вилки з мінімальними розмірами

Максимальний діаметр бобишки при захопленні деталі за циліндричну поверхню D_{max}, мм, обмежується двома умовами:

$$D_{max} = 2 \cdot (L_f + L_{sft});$$

$$D_{max} = 2 \cdot (0{,}7 \cdot H_{pr} - L_{sft});$$

де L_f – відстань від центру перетину площин, які утворюють призматичну поверхню рухомих призматичних рухомих пальців до базуючої поверхні основи, мм;

H_{pr} – висота призматичної поверхні, мм.

Максимальна довжина деталі між плоскими поверхнями при захопленні деталі $L_{in\ max}$, мм, дорівнює:

$$L_{in\ max} = L_{in} - 2 \cdot L_{sft};$$

де L_{in} – максимальна відстань між внутрішніми поверхнями м'яких накладок комплекту пальців, мм.

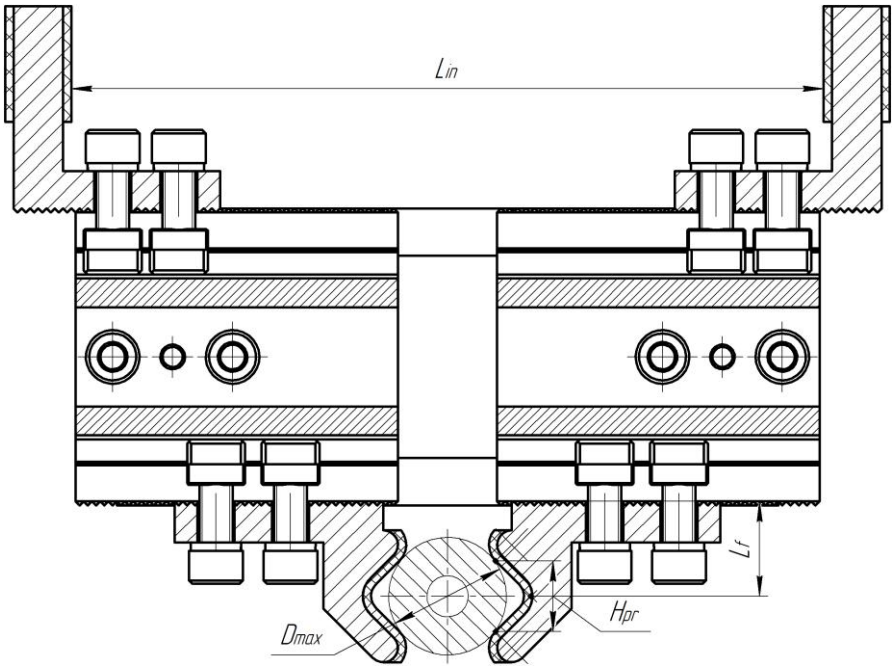


Рисунок 1.31 – Граничні габаритні розміри деталей, які можливо переміщувати даним захоплювальним пристроєм для переміщення вилки з максимальними розмірами

Для прикладу, розглянемо процес переналагодження захоплювального пристрою, а саме, зміну розташування плоских рухомих пальців для можливості

встановлення деталі іншого типорозміру. Після послаблення гвинтів 11 основа пальців 6 та плоскі рухомі пальці 9 виходять із зубчатого зачеплення. Після цього їх можна перемістити та налаштувати цим самим захоплювальний пристрій на необхідний розмір. При необхідності плоскі рухомі пальці 9 можна розвернути на 180° відносно осі отворів під гвинти 11, попередньо повністю вийнявши їх з основи пальців 6. Після цього гвинти 11 знову затягуються.

1.1.3.2 Захоплювальний пристрій для деталей типу шатуни

Для переміщення деталей типу шатуни промисловими роботами зазвичай використовують універсальні двопальцеві захвати зі змінними губками [167]. Захоплювальні пристрої даного типу відрізняються від аналогів простотою та надійністю, але вони мають такі недоліки: змінні губки не мають механізмів регулювання, тому під кожну деталь необхідний свій комплект губок. Також через те, що типовими способами отримання заготовки для деталей типу шатуни є штампування та лиття, має місце облой на місці стику форм, похибка їх відносного позиціонування та штамповочні і ливарні нахили. Це суттєво впливає на точність позиціонування деталі в захоплювальному пристрої та може призводити до пошкодження деталі чи функціональних елементів обладнання виробничої ділянки.

За основу захоплювального пристрою для деталей типу шатуни використано захват CHELIC HDW-63 [168]. Даний захват складається з силового та передавального механізмів. У якості силового механізму виступає пневматичний циліндр двосторонньої дії, у якості передавального механізму – клинова передача. Дане рішення характеризується простотою та надійністю, але для вирішення вищезазначених проблем необхідно додатково спроектувати гнучкі переналагоджувані пальці.

В основу запропонованої корисної моделі поставлене завдання спроектувати захоплювальний пристрій з можливістю затискати деталі типу шатуни за зовнішні поверхні, мати механізми компенсації похибок заготовок та можливість переналагодження під широку номенклатуру деталей. Також корисна

модель повинна швидко та надійно фіксувати заготовку у заданому положенні та мати модульну конструкцію.

Поставлене завдання виконується тим, що для підвищення гнучкості захоплювального пристрою спроектовано змінне налагодження, яке складається з основ, кареток та затискних пальців з м’якими накладками для компенсації похибок форми заготовки та похибок позиціонування заготовки у верстатному пристрої металорізального верстата. Затискні пальці можуть захоплювати деталь за зовнішні поверхні головок та шийки шатуна. Дане рішення дозволить скоротити витрати часу на підготовку виробництва та підвищити гнучкість виробничої ділянки. Крім того, можливість переналагодження дозволить скоротити непродуктивні витрати часу.

На рис. 1.32 зображено тривимірну модель захоплювального пристрою; на рис. 1.33 зображені конструктивні елементи захоплювального пристрою; на рис. 1.34 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо переміщувати за допомогою даного захоплювального пристрою при затисканні за циліндричні поверхні головок шатуна: а) – для переміщення шатуна з мінімальними розмірами; б) – для переміщення шатуна з максимальними розмірами, на рис. 1.35 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо переміщувати за допомогою даного захоплювального пристрою для переміщення шатуна з мінімальними розмірами при затисканні за шийку шатуна.

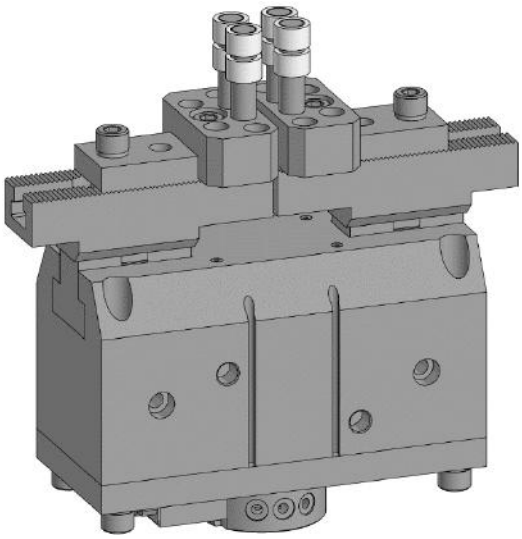


Рисунок 1.32 – Тривимірна модель захоплювального пристрою

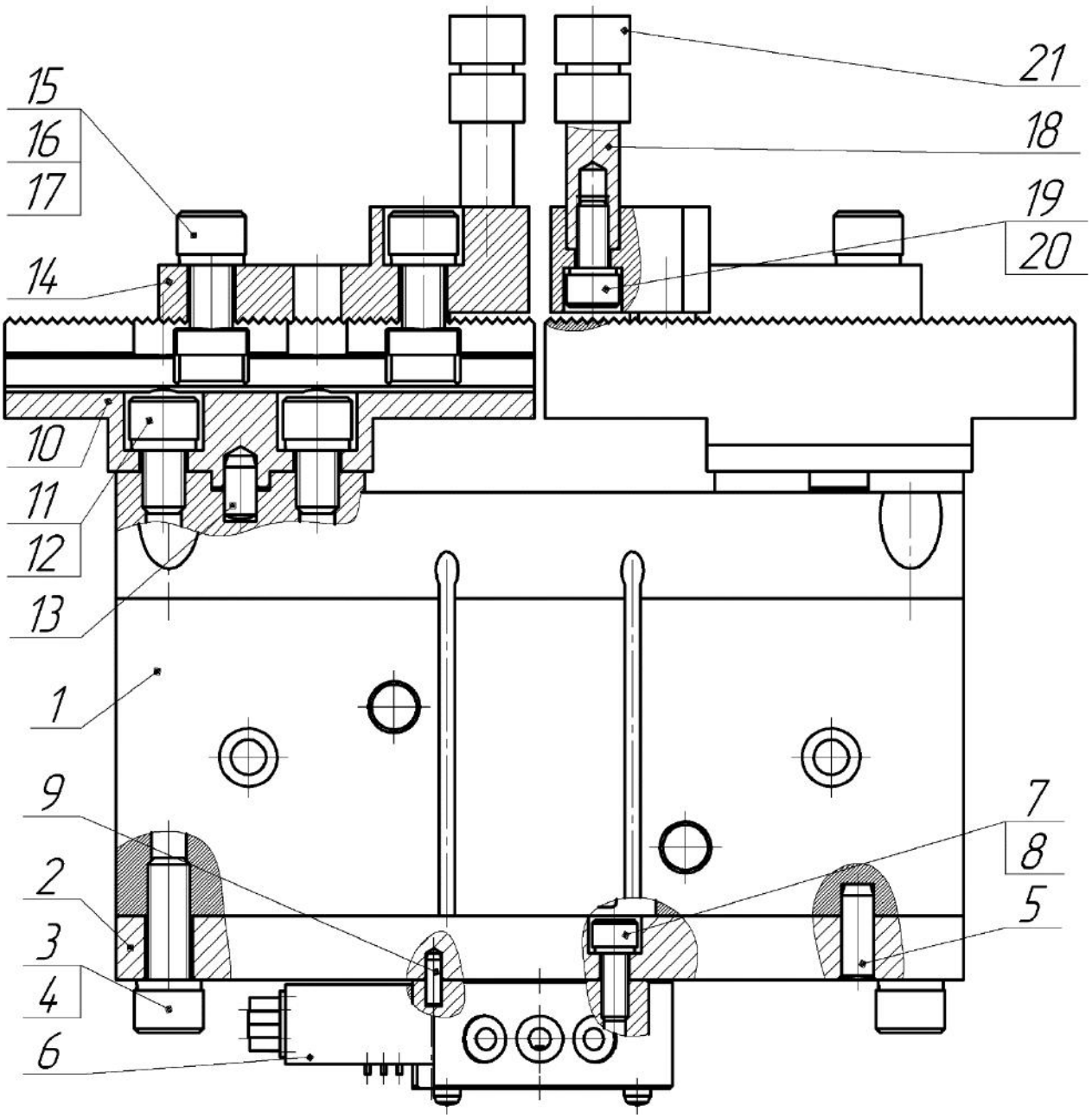
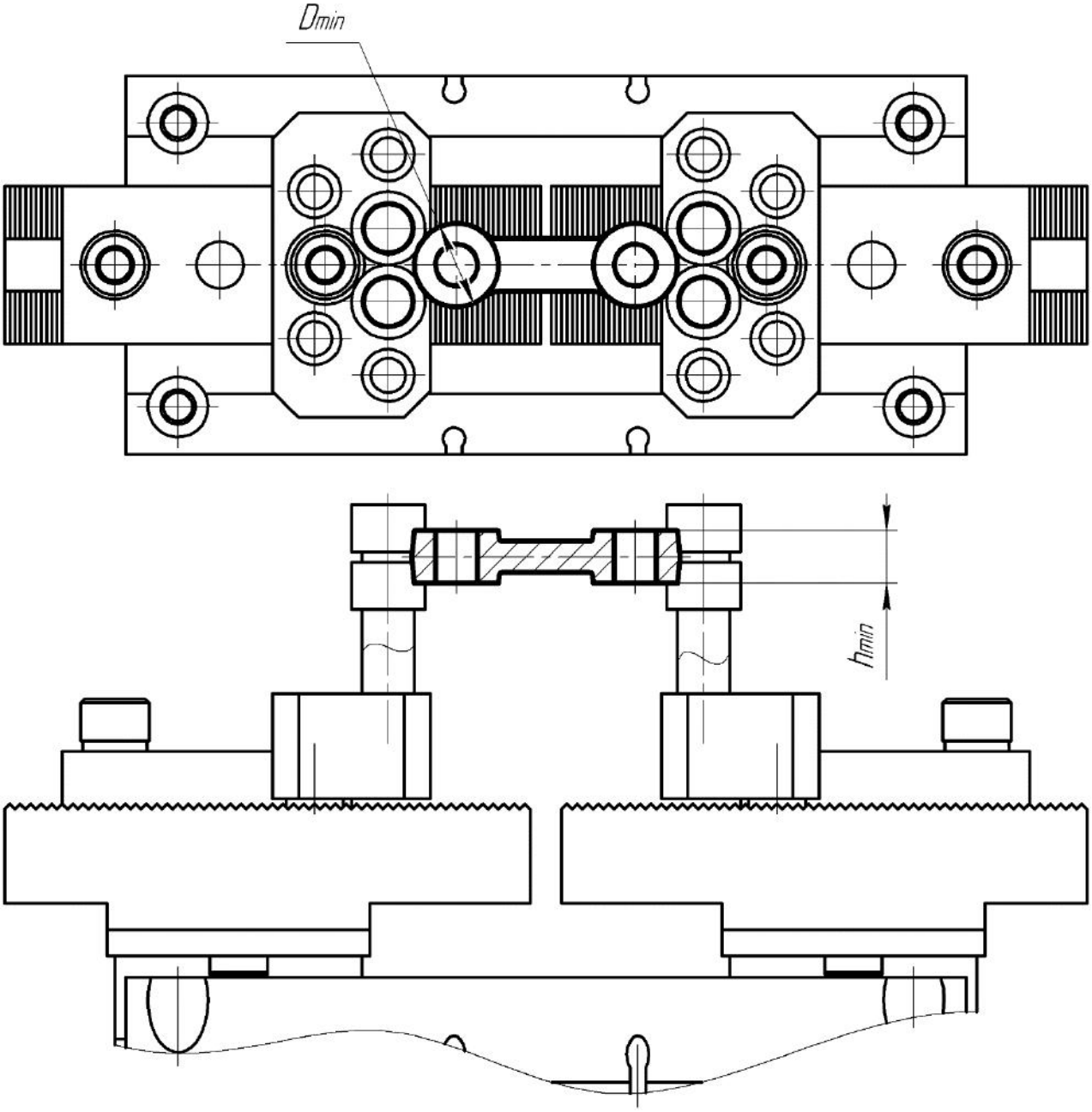


Рисунок 1.33 – Захоплювальний пристрій для деталей типу шатуни. Конструктивні елементи

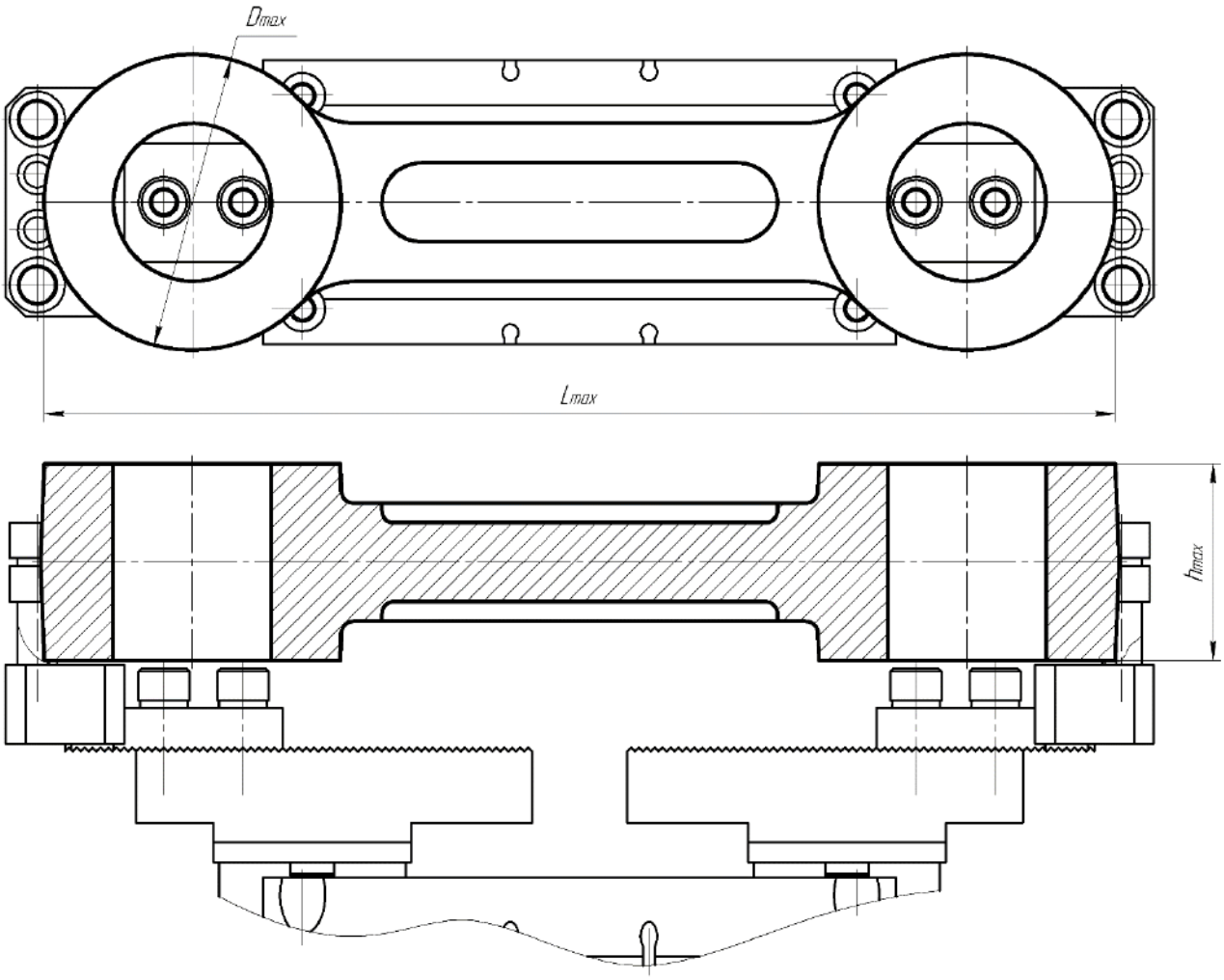
Запропонована конструкція захоплювального пристрою з перелагоджуваними пальцями для переміщення деталей типу шатуни складається з захвату 1 (рис. 1.33), що з’єднується з перехідною плитою 2 за допомогою гвинтів 3 з пружинними шайбами 4 та базуються один відносно одного за допомогою штифтів 5. У свою чергу перехідна плита 2 з’єднується з адаптером для автоматичної заміни захоплювального пристрою 6 за допомогою гвинтів 7 з пружинними шайбами 8 та базуються один відносно одного за допомогою

штифтів 9. На рухомі елементи захвату 9 встановлені основи 10, що закріплені за допомогою гвинтів 11 з пружинними шайбами 12 та базуються за допомогою штифтів 13. Основи 10 мають зубці для базування каретки 14.



а)

Рисунок 1.34 – Граничні габаритні розміри деталей, які можливо переміщувати за допомогою захоплювального пристрою при затисканні за циліндричні поверхні головок шатуна: а) – для переміщення шатуна з мінімальними розмірами; б) – для переміщення шатуна з максимальними розмірами



б)

Продовження рис. 1.34

Дані каретки фіксуються за допомогою гвинтів 15 з пружинними шайбами 16 та сухарями 17. Затискання заготовок та деталей відбувається за допомогою затискних пальців 18, що встановлені в каретки 14 та затискаються за допомогою гвинтів 19 з пружинними шайбами 20. Для компенсації похибок форми деталі та її позиціонування на затискні пальці встановлені м’які накладки 21, що характеризуються пружною деформацією (наприклад, які виготовлені з гуми, остаточний вибір матеріалу залежить від конкретних виробничих умов). Граничні положення пальців при налагодженні на мінімально (D_{min} та h_{min}) та максимально (D_{max}, L_{max} та h_{max}) можливі розміри шатуна при його захопленні за зовнішні поверхні головок приведені на рис. 1.34. Граничне положення пальців при налагодженні на мінімально можливі розміри ($b_{ш_min}$, $l_{ш_min}$ та $h_{ш_min}$) шатуна при його затисканні за шийку шатуна приведене на фіг. 4. При затисканні шатуна

даним способом фактором, який обмежує максимальні можливі розміри шатуна є вантажопідйомність захоплювального пристрою. Максимальна вага заготовки, на яку розрахований захоплювальний пристрій з урахуванням коефіцієнту безпеки – 5 кг.

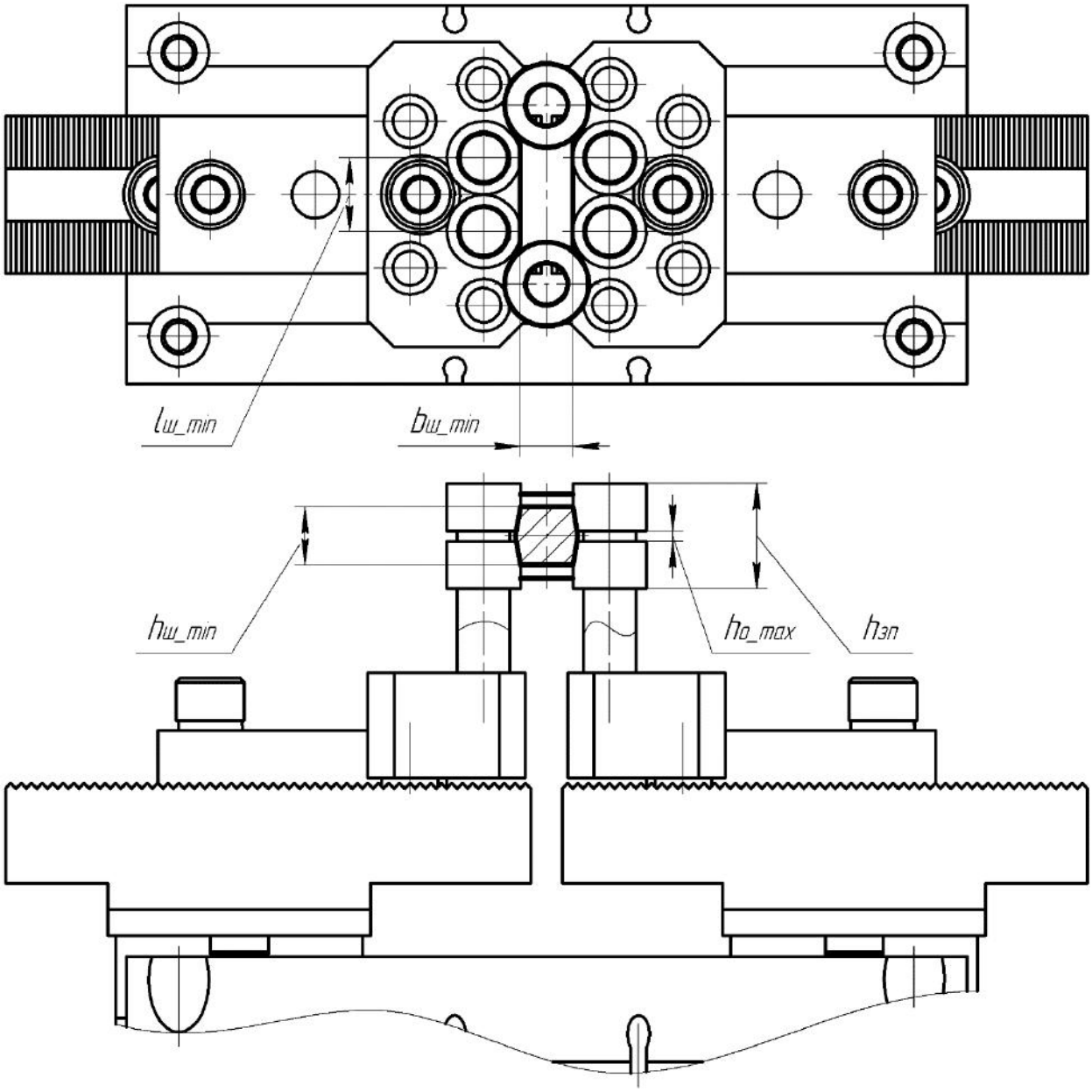


Рисунок 1.35 – Граничні габаритні розміри деталей, які можливо переміщувати за допомогою захоплювального пристрою для переміщення шатуна з мінімальними розмірами при затисканні за шийку шатуна

Спроектований захоплювальний пристрій має особливість: необхідно захоплювати деталь таким чином, щоб облой розміщувався між м’якими накладками, щоб уникнути їх пошкодження. Максимальна висота облою повинна

бути меншою ніж величина h_{o_max}. Тому при закріпленні шатунів висотою нижче розміру $h_{зп}$ (рис. 1.35) необхідний додатковий аналіз на колізії з обладнанням виробничої лінії.

Переналагодження захоплювального пристрою відбувається за наступним алгоритмом: після послаблення гвинтів 11 основа пальців 10 та каретки 14 виходять з зубчатого зачеплення. При необхідності налаштувати захоплювальний пристрій під інший діаметр головок шатуна необхідно зняти каретки 14, відкрутити гвинти 19, що утримують затискні пальці 18, та встановити їх в потрібне посадочне місце на каретках 14, після цього встановити пружинну шайбу 20 та затискнути їх гвинтами 19. Для зміни розміру між затискними пальцями необхідно перемістити каретки 14 в необхідне місце та затягнути гвинти 15.

1.1.3.3 Ефективність колаборативних виробничих ділянок

В цей час перед виробниками машинобудівної продукції постають сучасні виробничо-технологічні виклики, пов’язані з необхідністю інтенсифікації виробничих процесів. За цих умов одним із ефективних методів підвищення конкурентоспроможності є автоматизація виробництва за допомогою промислових роботів. Оскільки існує ускладнення конструкції виробів у зв'язку з необхідністю постійного вдосконалення їх характеристик і персоналізації, ручна робота залишається актуальною для складальних операцій. Цей факт пов’язаний зі складністю повної автоматизації через недостатню гнучкість і адаптивність роботів першого покоління та нездатність виконувати завдання, де втручання людини вимагало певного рівня інтелекту та навичок [169]. Також розгляд стану автоматизації монтажу зумовлений популярністю промислових роботів у складальних процесах. За даними дослідження [170], при всіх особливостях використання промислових роботів для автоматизації монтажу, це завдання є третім за популярністю серед нових установок промислових роботів у світі станом на 2022 рік.

Хоча роботи першого покоління досить ефективно автоматизують монотонну і небезпечну роботу, вони не можуть повноцінно взаємодіяти з виробничим середовищем і людьми. Тому для безпеки робота виділені окремі

зони, а робочі не мають доступу до робочої зони промислового робота першого покоління під час його роботи. Однак завдяки прогресу в області робототехніки, розвитку електроніки та інтелектуальних датчиків, збільшенню продуктивності обчислювального обладнання та зниженню вартості згаданих вище рішень з кожним роком все більше завдань можна автоматизувати за допомогою промислових роботів. день із збереженням високої якості, продуктивності та надійності [171]. Ці зміни призвели до появи роботів другого покоління (або колаборативних роботів). Вони можуть взаємодіяти з навколишнім середовищем і безпосередньо з людьми. Згідно з результатами дослідження [172], завдяки можливості поєднання гнучкості та адаптивності людей і можливостей колаборативних роботів (наприклад, повторюваності та здатності працювати безперервно протягом тривалого часу) стало можливим збільшити ефективність, економічність, гнучкість і продуктивність виробничих осередків.

Крім того, в роботі [173], яка присвячена конструюванню роботизованої секції для спільного складання пневматичних циліндрів, додатково зазначено, що якщо точність колаборативного робота є недостатньою, людина може це компенсувати за допомогою тактильні відчуття. Крім того, згідно з дослідженнями, впровадження колаборативних роботів значно знижує ризики розвитку професійних захворювань. Наприклад, робота [174] присвячена системі оцінки продуктивності комірки колаборації для складання електронних компонентів та ризику професійних захворювань. Зроблено у зв'язку з частою невиходом працівників на роботу внаслідок професійних захворювань опорно-рухового апарату. Використання колаборативного робота допомогло зменшити кількість незручних положень і зменшити навантаження на працівника. Робота [175] присвячена конструюванню колаборативної роботизованої комірки для складання шарніра рівних кутових швидкостей. Використання колаборативного робота допомогло знизити навантаження на оператора приблизно на 60%. Повна автоматизація цього процесу неможлива через необхідність високої точності та гнучкості. Це стало причиною зростання популярності колаборативних роботів: кількість нових інсталяцій з 2017 по 2020 роки зросла вдвічі – з 11 000 до 22 000 шт. [173]. Крім того, кожен відомий виробник промислових роботів має у своєму

каталозі декілька моделей колаборативних роботів (наприклад, ABB YuMi, Fanuc CR Series та KUKA LBR IIWA) [176].

Крім того, спільні виробничі осередки підвищують ефективність виробництва та загалом є економічно вигідними. Наприклад, у зв’язку зі збільшенням складності конструкції автомобілів розглядалася можливість автоматизації виробництва за допомогою колаборативних роботів, враховуючи тривалість циклу та кількість людей і роботів.

Порівняли параметри роботи людей і роботів окремо і разом. Результати свідчать про значне підвищення продуктивності монтажної ділянки. Однією з причин автори називають можливість розподілу людських і робототехнічних ресурсів у режимі реального часу для виконання робочого плану [177]. Також спільні роботи можуть підтримувати виконання завдань людиною з низькими витратами [1], забезпечуючи таким чином рентабельність часткової автоматизації процесу складання. Оптимальне планування необхідне для забезпечення економічної ефективності монтажної зони з використанням спільних роботів. Як приклад дослідження в цьому напрямку дослідники для правильної оцінки робочої станції запустили імітаційну модель, за допомогою якої вони отримали більше даних для розуміння системи, що дозволяє прийняти правильне рішення щодо засобів, які використовуються на клітина [175].

Підвищенню ефективності взаємодії людини і робота сприяє те, що робот може виконувати декілька функцій, наприклад, бути основним складальним пристроєм, подавати інструмент, наносити мастило та клей. Наприклад, BMW намагається представити колаборативних роботів, які допомагають людям з інструментами під час складання [178]. Крім того, завдяки розробці кінцевих елементів, ці завдання можна поєднувати, оскільки робот може швидко змінювати кінцевий механізм, наприклад, за допомогою пневматичної замінної системи SCHUNK SWS Series. Крім того, спільна робота під час складання може виконувати різні завдання, бути пристроєм із багатьма ступенями свободи, подавати інструмент, наносити покриття тощо. При цьому дані про завдання можуть об'єднуватися за рахунок можливості швидкої зміни інструменту. Крім того, для підвищення ефективності взаємодії людини з коллаборативним

роботом необхідно оцінити ефективність різних варіантів обміну інформацією. Згідно з роботою [176], існують такі типи взаємодії людини і робота: – передача інформації через зусилля: у цьому типі взаємодія відбувається через явний і навмисний контакт, при цьому робот повинен бути здатний адекватно реагувати на застосування сили; – безконтактна передача даних, наприклад, за допомогою жестів або голосових команд; – передача даних через інтерфейс, наприклад, кнопки, сенсорний екран. Крім того, запровадження роботів для співпраці дозволило запровадити систему навчання за допомогою демонстрації завдяки спробам спростити введення в експлуатацію дільниці, що стало можливим завдяки передовим датчикам і інструментам штучного інтелекту, які розпізнають, чи була взаємодія людини навмисною чи ненавмисною, і згладжують помилки для більш плавної роботи. КОНТРОЛЬ. Це дозволяє скоротити час підготовки виробництва за рахунок відсутності необхідності створення та налагодження керуючої програми та виконання колізійної перевірки [179]. Використання роботів поруч з людьми вимагає забезпечення безпеки людей від травм, які робот може їм завдати. Стаття [180] присвячена аналізу стану розвитку систем співробітництва, зокрема безпеки співробітників. Згідно з дослідженням, було введено кілька стандартів ISO для класифікації взаємодії людей і роботів, що співпрацюють. Наприклад, стандарт ISO 8373 визначає терміни, пов’язані з керуванням промисловими роботами, що використовуються в промислових умовах, включаючи взаємодію людини з роботом. Стандарт ISO 10218 у двох частинах визначає вимоги безпеки та обмеження промислового робота під час взаємодії з людьми. Стандарт ISO 15066 доповнює попередній стандарт і описує процедуру обмеження значень швидкості ланок робота, що, у свою чергу, впливає на підтримку значень сили та моменту на безпечному для людини рівні. На основі цих вимог були визначені наступні режими керування: – контрольована швидкість з рейтингом безпеки (робот зупиняється, коли людина потрапляє в небажану зону); – метод ручного керування (немає обмежень на швидкість елементів, але людина сама генерує команди для повного керування роботом); – контроль швидкості та відстані (залежно від відстані між людиною та роботом змінюється також максимально

можлива швидкість елементів робота); – обмеження влади та сили безпечною для порогу особою. Крім того, класифікація рівнів взаємодії безпосередньо впливає на вимоги безпеки: співіснування, кооперація та взаємодія, при якій взаємодія може бути фізичною та безконтактною [181].

Крім того, останнім часом були реалізовані наступні стратегії забезпечення безпеки людей [183, 182]:

– функції зупинки робота, окремо як захисна, так і аварійна зупинка;

– обмеження швидкості центральної точки інструменту;

– необхідна візуальна індикація стану колаборативного робота;

– обмеження робочої зони робота до мінімально необхідного об’єму;

– встановлення мінімально допустимої відстані між людиною та роботом;

– оцінка можливості зіткнення в реальному часі, наприклад, за допомогою систем машинного зору [178];

– технологічні та ергономічні вимоги: необхідно звести до мінімуму кількість предметів з гострими краями, забезпечити відсутність вібрацій, що передаються людині, проаналізувати простір на наявність достатнього вільного простору для запобігання можливості защемлення людини.

Обґрунтування необхідності проектування комірки спільного складання

Методологія дослідження ґрунтується на теоретичних основах технології машинобудування, основах проектування захватних пристроїв для промислових роботів, стандартах проектування коллаборативних робототехнічних зон, методі кінцево-елементного аналізу.

Оскільки спільна робота довела свою ефективність у промисловості, аналітики прогнозують значне збільшення кількості підприємств у найближчі роки та наступне десятиліття [183].

Запропоновано спроектувати та впровадити спільну складальну ділянку для монтажних операцій шатунно-поршневої групи (рис. 1.36).

Шатунно-поршнева група використовується в двигунах внутрішнього згоряння, наприклад, в автомобілях, мотоциклах, кущорізах, бензопилах та іншій дрібній техніці, а також в поршневих компресорах. Ця техніка досить поширена і доступна багатьом споживачам по всьому світу.

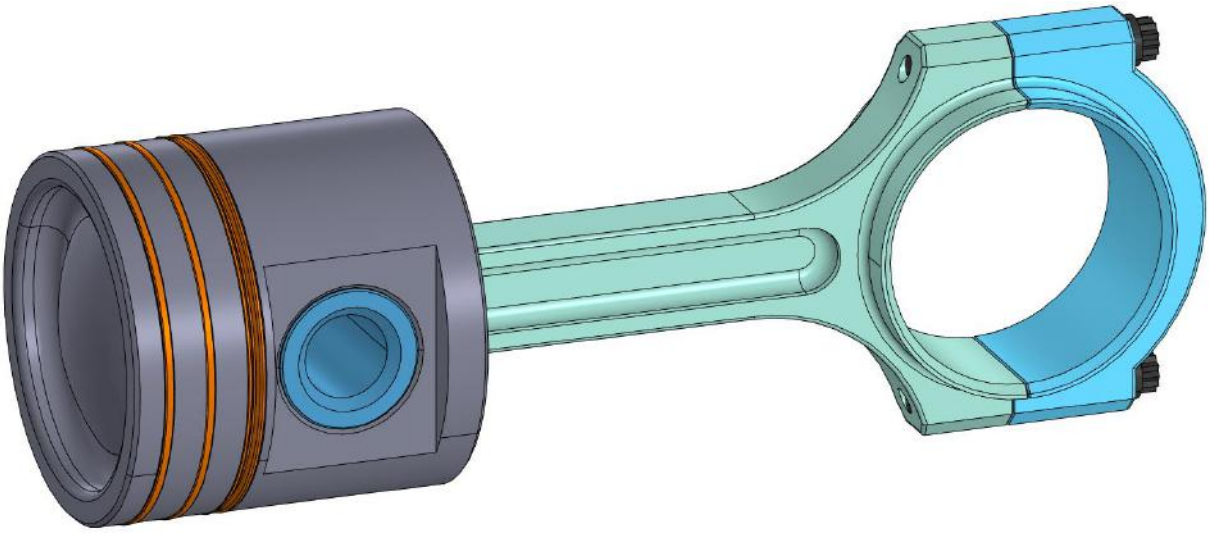


Рисунок 1.36 – Шатунно-поршнева група

Одночасно складність автоматизації полягає у високій точності елементів. Крім того, постійні зміни екологічних стандартів викидів змушують виробників постійно підвищувати ефективність двигунів внутрішнього згоряння. Тому монтажна ділянка повинна бути гнучкою і працювати з різними конструкціями шатунно-поршневої групи. Крім того, використання ручної праці пов'язано з небезпекою, яка виникає, оскільки деякі конструктивні виконання цього агрегату передбачають нагрівання шатуна, що може призвести до виробничих травм. Тому найбільш раціональним варіантом реалізації монтажного процесу є реалізація спільної збірки.

Планування структури складальної операції

Процес складання з’єднання шатунно-поршневої групи складається з наступних етапів:

1) встановити шток у пристрій (цей етап забезпечує точне розташування штока відносно поршня);

2) нанести мастило на зовнішню циліндричну поверхню штока;

3) намазати маслом отвори в поршні для розташування штока;

4) нагріти шийку шатуна до температури 280-320°C (підготовити до пресування);

5) затиснути шатун в губках;

6) з’єднати шатун, поршень і шток (необхідно звернути увагу на правильність взаємного розташування деталей);

7) вийняти шток з приладу;

8) перевірити плавність руху шатуна відносно поршня (після охолодження деталей);

9) помістити складальну одиницю в контейнер.

При ручній збірці всі операції виконуються послідовно, що збільшує витрати часу на виконання операції.

Оскільки використання колаборативних роботів дає можливість паралельно виконувати певні етапи, пропонується організувати роботу колаборативної секції за такою схемою (рис. 1.37).

Для виконання монтажної операції за цією схемою необхідно розробити план колабораційної комірки (рис. 1.38).

Колаборативна ділянка працює наступним чином: деталі для складання подаються конвеєром випадковому порядку, після цього дельта робот з використанням систем машинного зору сортує пальці, шатуни та поршні по комплектам. Далі колаборативний робот подає шатун в установку для його нагріву, подає поршень та палець для їх подальшої підготовки для складання та подає перевірену складальну одиницю на вихідний конвеєр. Використання робота для нагрівання дозволить точно контролювати час нагріву, забезпечує відсутність контакту людини з небезпечним обладнанням.

Під час нагрівання шатуна оператор встановлює палець в спеціальний пристрій, що забезпечить правильне розташування пальця відносно поршня, та наносить масло на зовнішню циліндричну поверхню пальця та на отвори поршня. Після підготовки поршня та пальця, а також нагріву шатуна, колаборативний робот подає шатун оператору для виконання процесу складання. Оператор з’єднує палець, шатун та поршень згідно креслення та витримує паузу для охолодження складальної одиниці. Робочий стіл з метою забезпечення безпеки контролюється системою машинного зору на предмет контакту гарячого шатуна з оператором. Після цього, оператор знімає спеціальний пристрій з

пальця. Далі оператор перевіряє плавність ходу поршня відносно шатуна, а колаборативний робот подає новий шатун в установку для його нагрівання.

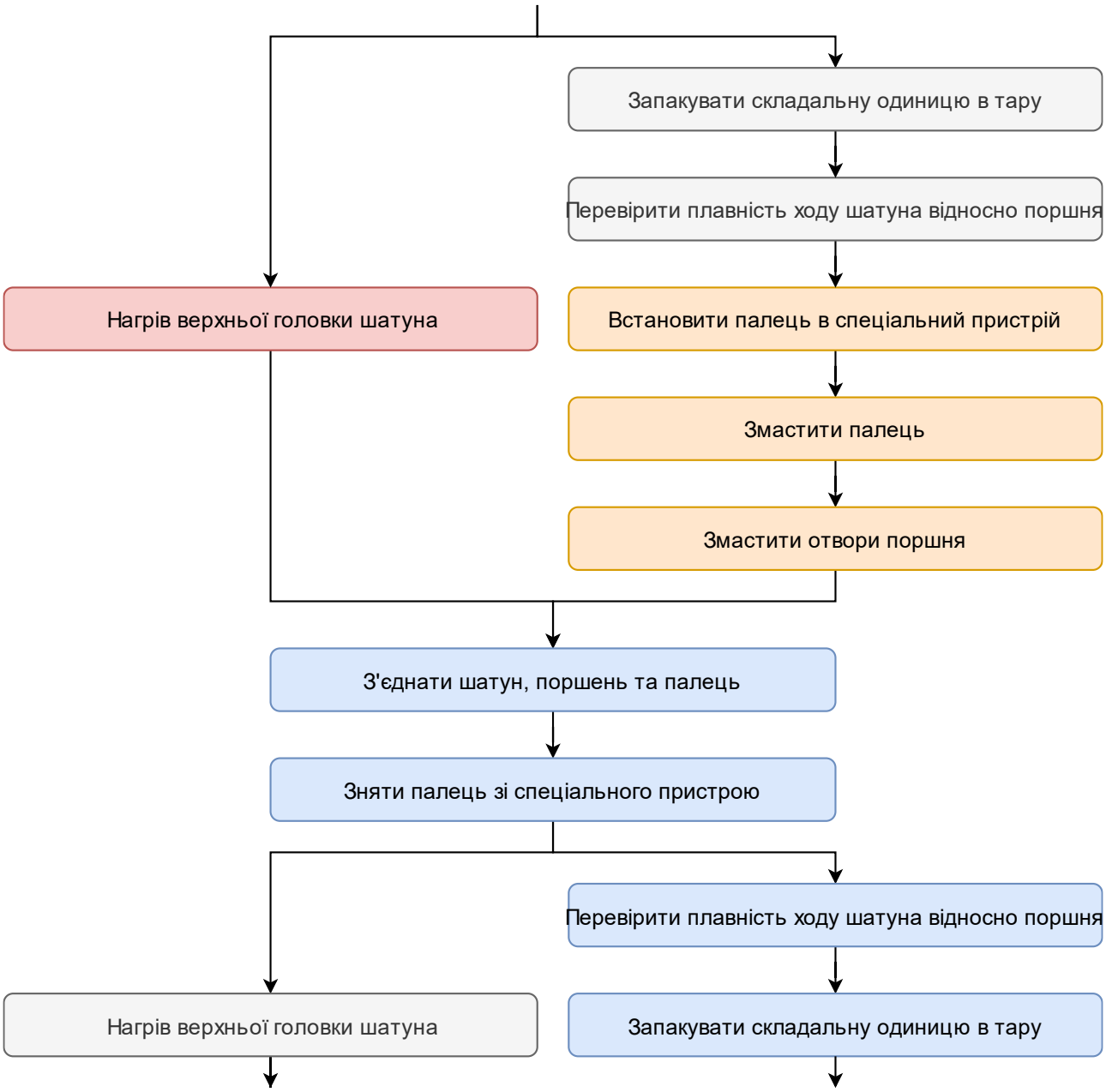


Рисунок 1.37 – Процес складання поршнево-шатунної групи з використанням колаборативного робота

Вибір технічного забезпечення для механоскладального осередку

Для сортування деталей пропонується використовувати дельта-робота на базі Delta XS [184]. Роботи з дельта-кінематикою найкраще підходять для сортування, оскільки мала рухома маса забезпечує високу швидкість руху.

Відкриті креслення та програмне забезпечення для його керування дозволять у майбутньому модернізувати його відповідно до потреб виробництва.

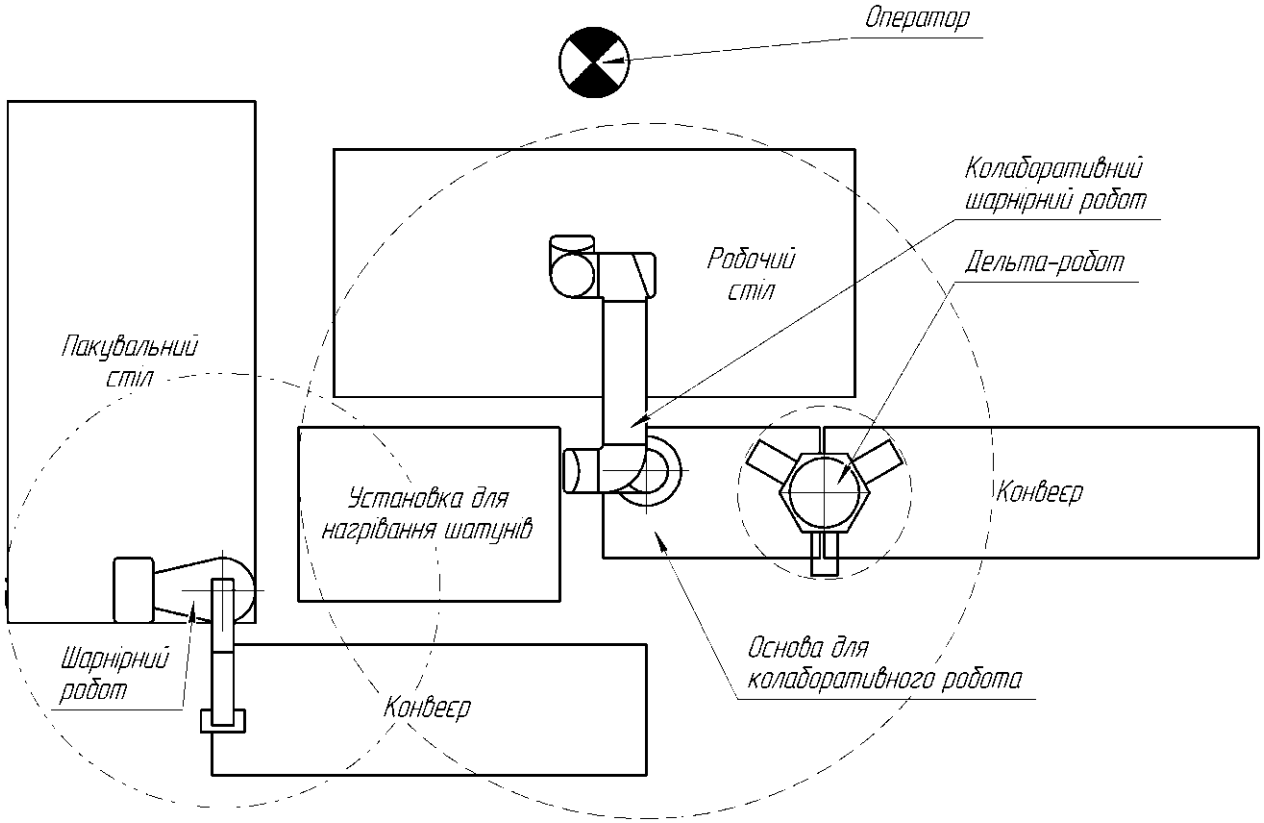


Рисунок 1.38 – План складальної ділянки

Як захватний пристрій пропонується використовувати адаптивні штанги серії DHAS та паралельний пневматичний захват серії HGPL-B (Festo) [185].

Використання пневматичного захвату забезпечує достатню силу затиску, а використання адаптивних поліуретанових стрижнів забезпечує гнучкість (можливість затискати деталі різних типорозмірів без переналаштування). Біля

При цьому використання поліуретану забезпечує термостійкість, стійкість до дії мастильних матеріалів і зносостійкість.

Для роботи з оператором пропонується використовувати колаборативного робота Universal Robot UR5 (рис. 1.39). Це рішення має достатню для цих завдань вантажопідйомність, робочу зону та захист від бризок.

Запропоновано новий дизайн хапального пристрою для колаборативного робота. Загальний вигляд пристрою захоплення показаний на рис. 1.40.

Гнучкість захватного пристрою дозволяє надійно затискати деталі різних типорозмірів. Для забезпечення безпеки оператора в місцях з гострими краями

передбачені гумові накладки. Вага захватного пристрою 3 кг, вантажопідйомність робота 5 кг.

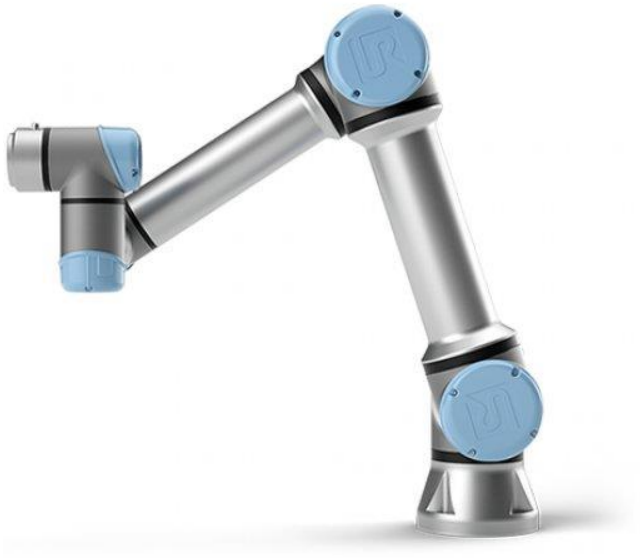


Рисунок 1.39 – Колаборативний робот Universal Robot UR5

Запропонована конструкція захватного пристрою забезпечує скорочення витрат часу на підготовку виробництва, підвищення ступеня гнучкості, що сприяє розширенню діапазону розмірів деталей, що встановлюються, і компенсації похибок, пов’язаних з технологічним процесом отримання. заготовки.

A14 ВИРОБНИЦТВО: Машини та інструменти Для пакування готових складальних одиниць пропонується використовувати робота Annin Robotics AR3. До його переваг можна віднести достатню пропускну спроможність для цих завдань, простоту, доступність технічної документація для майбутньої модернізації, та дешевизна.

Як захватний пристрій пропонується використовувати адаптивні штанги серії DHAS і паралельний пневматичний захват серії HGPL-B (Festo).

Розрахунки на міцність

Для перевірки захватного пристрою на міцність і надійність фіксації заготовки необхідно виконати розрахунки механічної системи «захватний

пристрій – деталь» методом кінцево-елементного аналізу в програмному забезпеченні ANSYS Workbench.

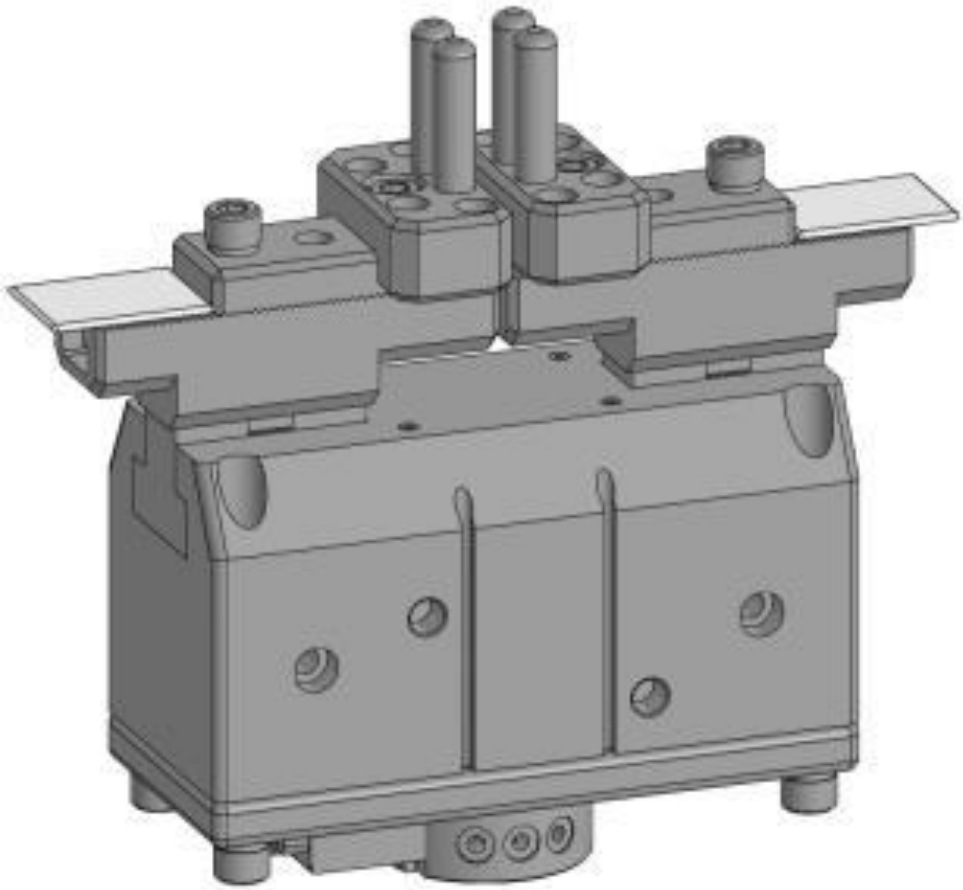


Рисунок 1.40 – Конструкція кріплення

У розрахунках використовувалися коефіцієнти тертя:

пара сталь-сталь – 0,15; пара сталь-алюміній - 0,17.

Величина і напрям прикладених зусиль при захопленні деталі наведені на рис. 1.41.

Результати розрахунку (переміщення та деформація елементів захватного пристрою) наведені на рис. 1.42.

Результати аналізу показують, що захватний пристрій можна використовувати для затискання та переміщення деталей у виробництві.

Оцінка ефективності колаборативної складальної ділянки

Для оцінки ефективності праці необхідно розрахувати тривалість циклу для повністю ручного та спільного складання.

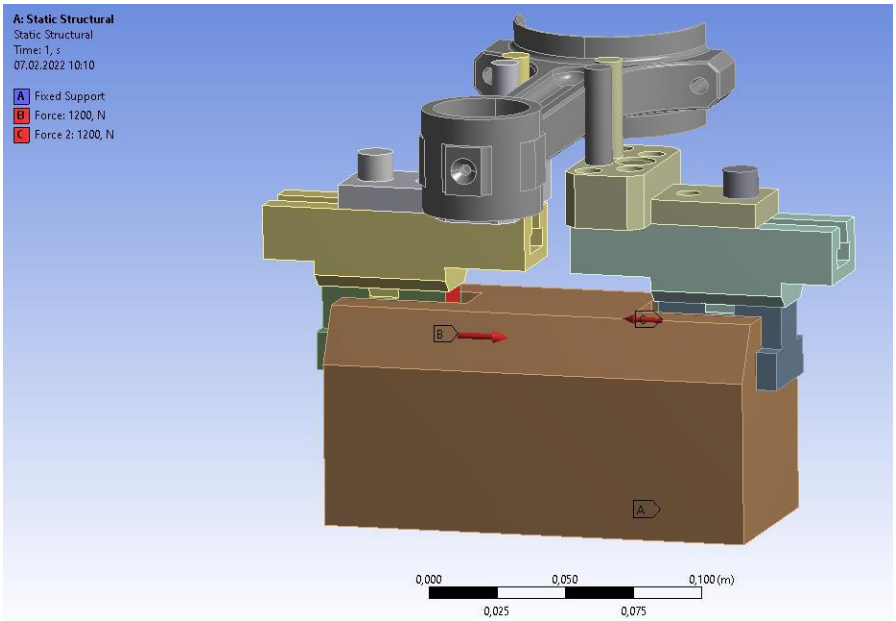
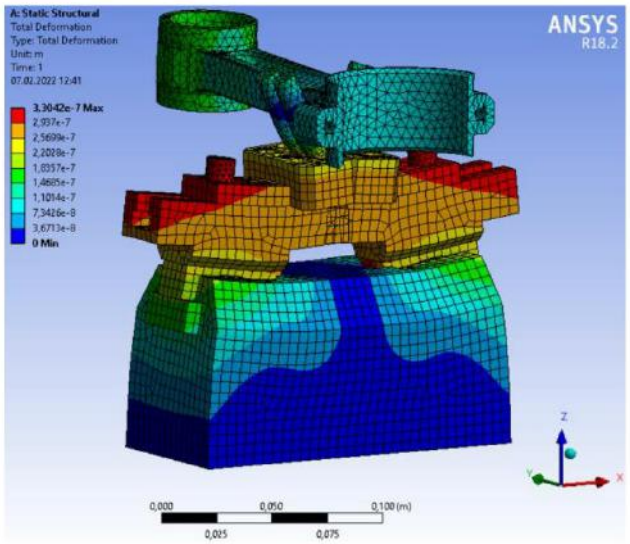
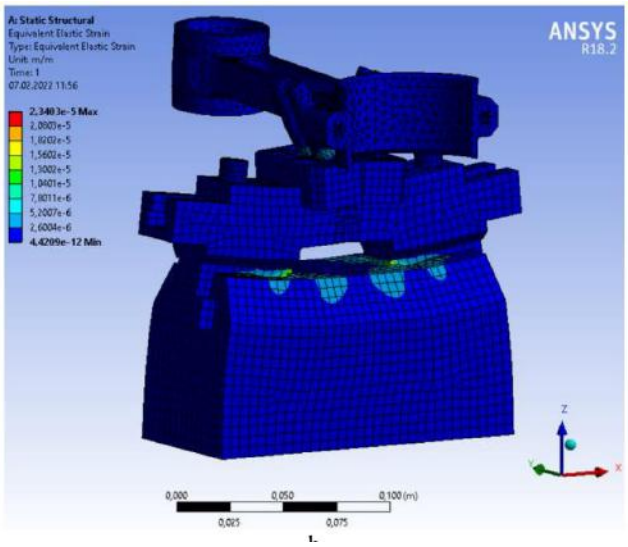


Рисунок 1.41 – Сили затиску



a)



b)

Рисунок 1.42 – Переміщення (а) і пружна деформація (б)

Призначені норми часу на всі переходи та операції складання для ручного та спільного складання вказані в табл. 1.9.

Таблиця 1.9 – Затрати часу на переходи складальної одиниці

№ пер.	Зміст роботи	Затрати часу, хв
1	Нагріти шийку шатуна до температури 280–320 °С	2,6
2	Встановити палець в спеціальний пристрій	0,6
3	Нанести масло на зовнішню циліндричну поверхню пальця	0,17
4	Нанести масло на отвори в поршні для базування пальця	0,17
5	Закріпити шатун в лещатах	0,12
6	З'єднати поршень, шатун та палець	0,9
7	Зняти спеціальний пристрій з пальця	0,6
8	Перевірити плавність ходу шатуна відносно поршня	0,5
9	Покласти складальну одиницю в тару	0,5

Слід зазначити, що деякі технологічні переходи виконуються паралельно, а отже, це скорочує час здійснення процесу ошпарювання.

Розрахунки підтвердили, що ручне складання займає 6,16 хвилини, а спільне – 4,1 хвилини, що на 34% менше.

Знаючи яким чином виконуються переходи при ручному та колаборативному складанні (рис. 1.37 та рис. 1.38 відповідно), можемо отримати, що на ручне складання затрачується 6,16 хв, а при колаборативному складанні 4,1 хв, що є на 34% менше.

Окрім підвищення продуктивності, завдяки впровадженю колаборативної ділянки знижується ризик опіків робочого.

Тому підвищується продуктивність складальної операції. Крім того, автоматизація процесу складання за рахунок реалізації колаборативної зони забезпечує зниження ризику отримання опіків для слюсаря-монтажника та знижує навантаження на нього під час виконання завдань.

Таким чином, наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному.

По-перше, запропонований новий підхід до проектування технології складання виробів в умовах багатономенклатурного виробництва шляхом

запровадження колаборативної складальної ділянки, що підвищує ефективність виробництва.

По-друге, обґрунтовано доцільність конструкції та розроблено конструкторсько-технологічне забезпечення осередку КСЗ, що дозволяє збільшити технологічний процес складання шатунно-поршневої групи в умовах багатономенклатурного виробництва.

Нарешті, запропоновано нову конструкцію захватного пристрою для колаборативного робота, яка розширює технологічні можливості виробничої площі за рахунок можливості встановлення деталей у певному діапазоні типорозмірів, підвищуючи ефективність процесу складання.

Практичне значення отриманих результатів для машинобудування складається з розробки конструкторської та технічної документації комірки КС, конструкторської документації нового захватного пристрою та практичних рекомендацій.

1.1.3.4 Концептуальне використання доповненої реальності в обслуговуванні виробничих потужностей

Технологія AR стає все більш популярною в наш час, також через інтерес до різних галузей. Цей інтерес, попит на ці технології призводить до розробки нових спеціалізованих програмних і апаратних рішень, використання та доступність яких діаметрально відрізняється від минулого. Це в основному приносить користь тим областям, де інтеграція цих технологій є проблематичною, це не відповідає цільовій цільовій цільовій цільовій цільовій системі або вимагає фінансових витрат. [186]

Потенціал цієї технології, будь то у сфері IoT і напр. візуальне відображення параметрів виробничого обладнання з інтерпретацією даних в поле зору працівника через AP. Інші потенційні сфери використання включають підвищення ефективності освіти та навчання персоналу або пряму інтеграцію в навчальний процес у школах з технічною спрямованістю під час викладання предметів, що вимагають уміння читати технічну документацію. [187] Його використання також можливе в інших областях, наприклад, у публікації,

опублікованій R. Costa et. ін., «Інтелектуальна змішана реальність для створення середовища проживання», яка представляє можливість використання засобів змішаної реальності в догляді в концепції вирішення електронно орієнтованої системи моніторингу охорони здоров'я. Як бачимо, технології змішаної реальності, зокрема технологія AR, мають широкий спектр використання. [188]

Ця публікація познайомить з можливим використанням у сфері виробництва, точніше, запропонує концепцію можливого вирішення ситуації, в якій потрібна допомога, для нового або недостатньо кваліфікованого працівника в процесі симуляції сервісного втручання. [189]

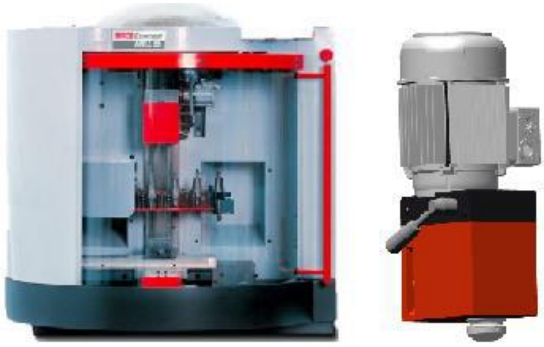
Програмне забезпечення для технічної ілюстрації як частина послідовності AR

Що стосується методології рішення для моделювання, призначеного для представлення можливостей реалізації концепції використання AR в операціях з технічного обслуговування, є кілька модельних ситуацій на вибір. Існує можливість використовувати AR для позиціонування пристосувань і пристосувань у процесі обробки, як описано в публікації, присвяченій визначенню положення заготовки та пристосування за допомогою AR. [190] Іншою можливістю є використання інтерактивних моделей при створенні технічної документації [191], або навчання користувачів підвищенню ефективності виробничих цехів. [192]

У цьому випадку модельна ситуація передбачає необхідність заміни фрезерної оправки та зняття кришки корпусу електродвигуна для виконання невизначеної перевірки. Таким чином, послідовність містить уже згадану модель приводу шпинделя, показану на рисунку 1b. Потім він імпортується в програмне забезпечення технічної документації, в якому окремі частини послідовності розташовані в хронологічному порядку та додаються необхідні ефекти та попередження. [193] Потім у публікації описується створення UI пристрою виводу та об'єднання всіх елементів послідовності AR в один блок. Таким чином, очікуваним результатом є модель шпиндельного приводу, яка відображається в полі зору користувача, який поступово відтворює окремі кроки послідовності і, таким чином, виконує необхідні кроки для сервісного втручання. У той же час

інтерфейс користувача повинен забезпечувати достатній простір для інтерактивності моделі САПР, що забезпечується попередньо визначеними функціями, які будуть доступні в інтерфейсі користувача та дозволять ефективніше контролювати послідовність. [194]

Як уже зазначалося, для застосування цієї технології вибрано обладнання з фрезерного верстата Emco mill 55, показаного на рис. 1.42. Зокрема, одна його частина, привід шпинделя. У рамках створення послідовності необхідно було зробити розмірну та геометрично точну копію секвенованого пристрою. Цю модель CAD можна побачити на рис. 1.44 і це комплексний набір в масштабі 1:1, що містить усі компоненти реального обладнання.



a) b)

Milling spindle drive	
Motor power 3 phase asynchronous motor	0,75 kW
Speed range	150 – 3500 rpm
Max. torque	3.7 Nm (2.72 ft/lbs)
Speed with optional engraving spindle	14000 min^{-1}
Feed drive	
3 phase step motor in X / Y / Z axis with resolution	0,5 µm / 0,5 µm / 0,5 µm
Rapid motion speed and feed rate X / Y / Z	0 – 2 m / min (0 – 78.74 ipm)
Average positioning variation in	8 µm / 8 µm / 8 µm

Рисунок 1.43 – Фреза Emco 55 та її шпиндельний привід, обраний для застосування технології AR

Окремі кроки покажуть підготовку послідовності, тобто створення супровідної ARE для працівника. Потім ця послідовність буде використана для керівництва користувачем щодо заміни фрезерної оправки та втручання в електричну коробку двигуна пристрою. [195]

Створення послідовності

Представлений APE також повинен містити послідовність, що показує окремі етапи дій сервісу в полі зору користувача. При цьому необхідно досягти інтерактивності використовуваних моделей САПР з користувачем. Якби лише анімація використовувалася як форма навчального відео, це відео просто відтворювалося б у полі зору користувача, а його взаємодія була б обмежена

основними елементами керування, які використовуються у відеофайлах. Однак у цьому випадку ми хочемо досягти послідовності відтворення компонування окремих частин пристрою, можливості його обертання, зміни розміру, масштабування та реалізації візуальних сповіщень і попереджень. Вони повинні попереджати користувача про важливі частини послідовності або неминучу небезпеку. [196]

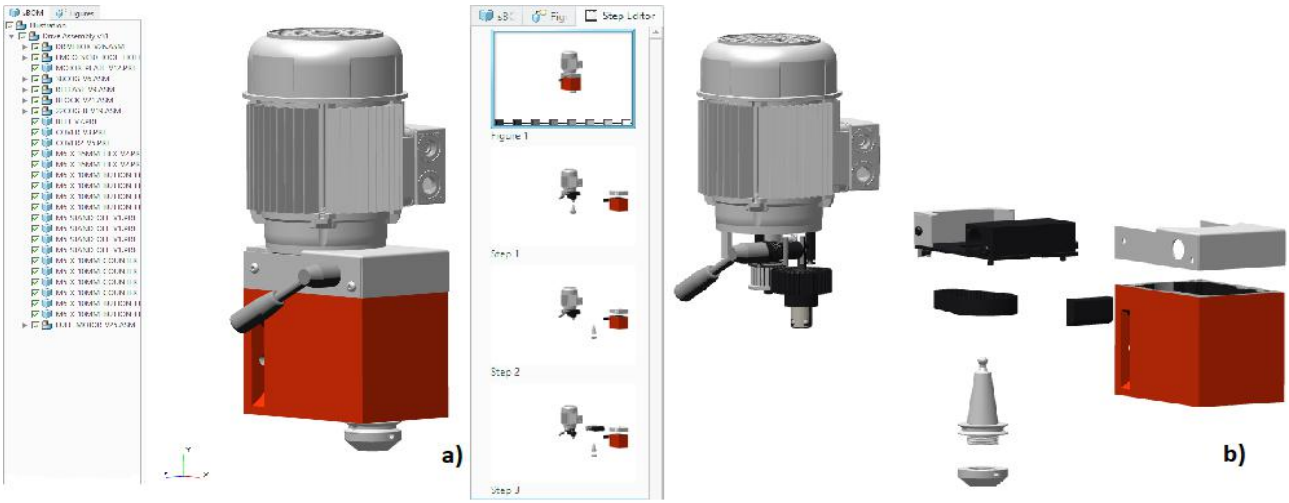


Рисунок 1.44 – Приклад використання програмного забезпечення для створення технічних ілюстрацій

Для створення такої послідовності використовуємо програму PTC Creo illustrate. Це програмне забезпечення спочатку призначене для обробки технічної документації, створення планів монтажу та демонтажу, інструкцій або презентаційних анімацій, що складаються зі збірок САПР. У нашому випадку це програмне забезпечення є важливою частиною всього процесу. Завдяки стисненому вихідному формату PVZ. Шляхом простого виділення формату PVI ми отримуємо векторні дані, пов’язані з рухом і положенням окремих моделей CAD. Потім ми можемо призначити їх окремим моделям у послідовності AR. Цей процес необхідний для оптимізації послідовностей для вихідного обладнання. Який характеризується різноманітністю та нижчою продуктивністю, що ускладнює роботу зі складними анімаціями. [197]

На рис. 1.43 показана CAD-модель шпиндельного приводу, імпортована в програмне середовище, разом з усіма елементами збірки. Як видно, це середовище ідентичне різному комерційному програмному забезпеченню САПР. Однією з відмінностей є можливість створювати послідовності, які поєднуються зі звичайними функціями програмного забезпечення САПР. На рисунку 2b, таким чином, показаний приклад можливого розташування послідовних зображень при створенні так званого плану розбирання шпиндельного приводу. Макет зображень, кількість операцій над кожним зображенням і різноманітні інші типи модифікацій, доступних для цього програмного забезпечення, також можуть бути включені до вмісту, що відображається в AR. [198]

Створення анімаційної послідовності для досвіду AR

Як уже зазначалося, створення окремих ділянок послідовностей і їх складність залежить від відображуваної дії. На рисунку 1.44 показано введення в послідовність створення, яка інструктує працівника у два кроки щодо заміни фрезерної оправки. Як ми бачимо на рисунку 3a, на першому етапі маркер підсвічується і таким чином сповіщає користувача про сповіщення моделі. Ми досягаємо цього, використовуючи функцію «Flash» і створюючи колір, який слід використовувати для виділення моделі. На другому кроці, показаному на рис. 1.45, ми додаємо обертання ручки в потрібному напрямку. У цих двох кроках ми створюємо основу послідовності для вивільнення фрезерної оправки.

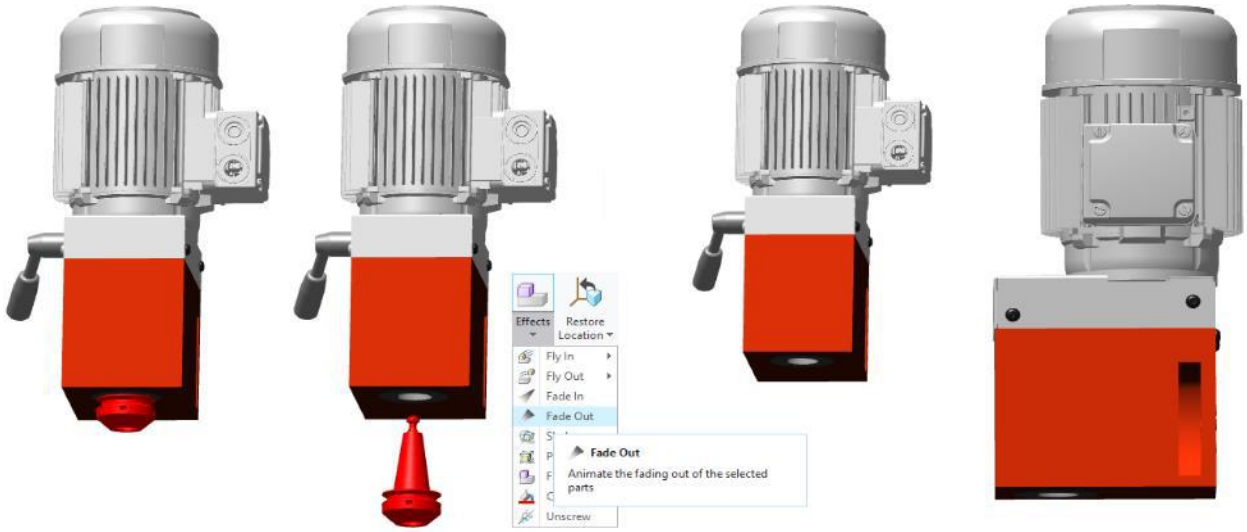


Рисунок 1.45 – Поступове додавання функцій до послідовності для досвіду AR

Наступна фаза послідовності попереджає користувача про звільнення фрезерної оправки. Використовується та сама функція підсвічування, що й у першому кроці. Зображення послідовності потім розширюється за допомогою перекладу та функції "згасання". Додаючи ці зміни, ми досягаємо відображення попередження користувача про звільнення фрезерної оправки, відображення напрямку та відстані, на яку цей компонент повинен бути витягнутий, і його видалення з поля зору користувача. Кінець послідовності складається з обертання вузла приводу шпинделя та наближення розподільної частини електродвигуна.

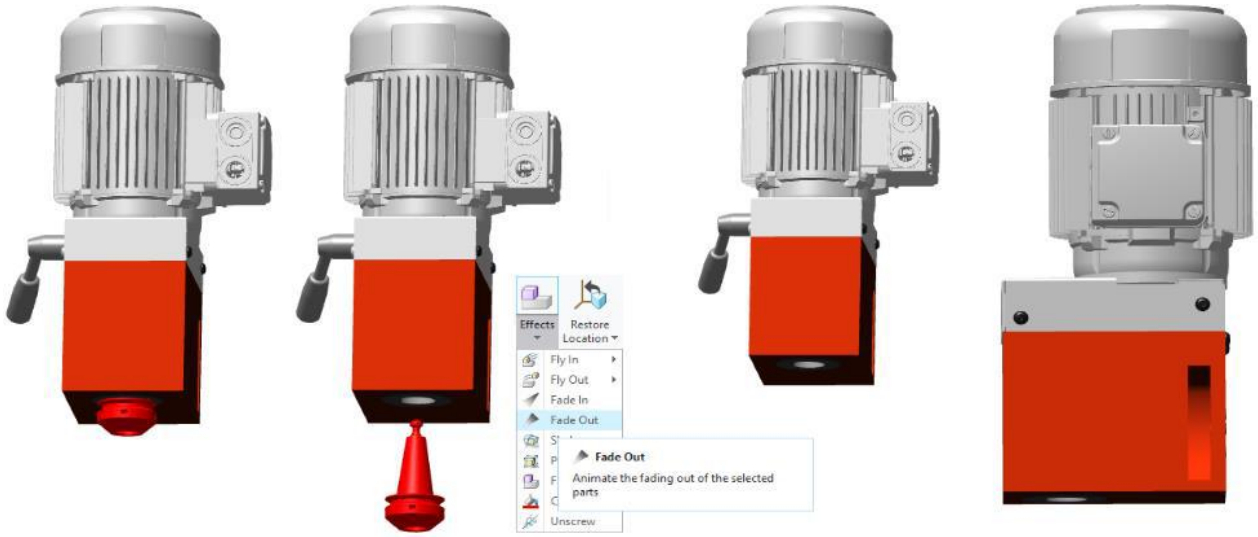


Рисунок 1.46 – Додавання додаткових частин послідовності

Останньою частиною послідовності є зняття кришки корпусу електродвигуна. У зв’язку з цією акцією було використано чотири функції. Перше полягало в тому, щоб виділити гвинти, які потрібно було видалити. Це було зроблено так само, як і в попередніх двох кроках. Ще одним кроком було додавання анімації відкручування болтів у попередньо вибраному напрямку та їх зняття разом із кришкою корпусу. Остання частина послідовності складається з відображення вмісту справи та додавання сповіщень, як показано на рис. 1.45.

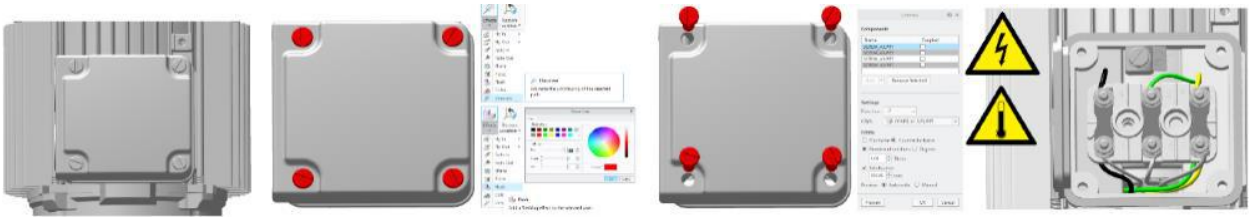


Рисунок 1.47 – Створення послідовності попереджень

Після визначення всіх зображень у послідовності та додавання функцій до всіх компонентів файл легко зберегти. Його вихідним форматом є PVZ, це стислий формат, що містить векторні дані та окремі моделі CAD. Через апаратну продуктивність пристроїв, для яких готується послідовність, особливо для пристроїв Android та iOS, файл у цьому форматі є незадовільним. З цієї причини з нього витягується лише файл PVI, що містить векторні дані. Слід зазначити, що окремі частини створеної таким чином послідовності повторюються, і положення кожного компонента можна скинути. [199]

Визначення параметрів інтерфейсу користувача для конкретного типу пристрою

Після успішного визначення часу та підготовки послідовності залишилося ще два кроки. Вони необхідні й описані в наступних розділах, а також для реалізації ARE. У цій главі представлені два характерні етапи створення послідовності, пов’язані з вибором відповідного типу пристрою та визначенням інтерфейсу користувача. [200]

1. Параметри налаштування пристрою

Як уже зазначалося, через попит на ці технології в даний час з'являється все більше видів спеціалізованого програмного забезпечення. Для цієї публікації використовується пакет PTC Creo, що містить 3 типи самокерованих програм, результат яких взаємодіє в інтерактивній послідовності в AR. Цей програмний пакет складається з програмного забезпечення САПР PTC Creo 8.0, PTC Creo Illustrate, принцип і використання якого у зв’язку з розв’язаним моделюванням описано в попередньому розділі, третє програмне забезпечення – Vuforia studio.

Ця окрема програма зосереджена на підготовці інтерфейсу користувача для пристроїв, показаних на рис. 1.49. Ця підготовка складається з двох частин, які можна назвати передньою та задньою частиною. Інтерфейс, тобто видима

частина інтерфейсу користувача, містить усі елементи керування моделлю, що забезпечує інтерактивність користувача з моделлю в AR. Ця частина оптимізована для 3 типів пристроїв. [201]

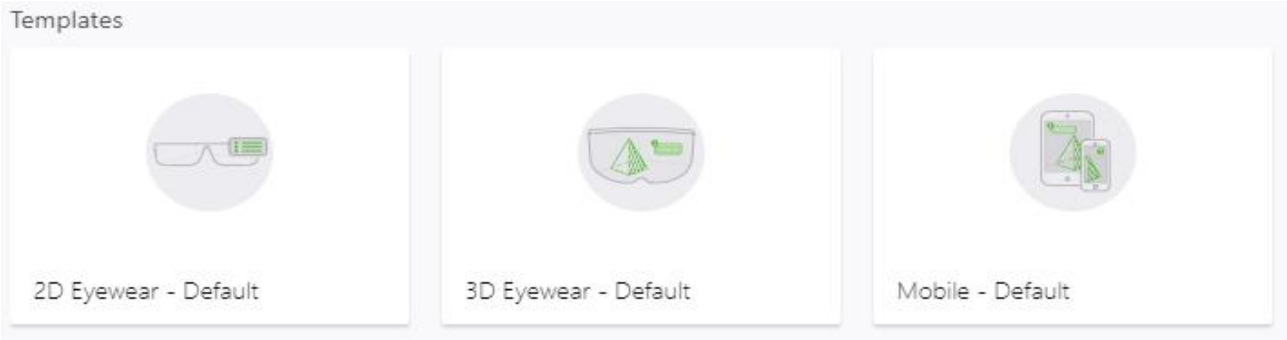


Рисунок 1.48 – Варіанти вибору пристрою перед створенням нового проекту

Щоб мати можливість переглядати зібрані дані в режимі реального часу в програмі Vuforia View, необхідно створити програму в програмі Vuforia Studio. Спочатку ми відкриємо Vuforia Studio та виберемо створення нового проекту. Ми побачимо 3 варіанти для нового проекту, як можна побачити на рис. 1.48. Ми можемо вибирати між варіантами для 2D-окулярів (рис. 1.49a), 3D-окулярів (рис. 1.49b) і розумних пристроїв (рис. 1.49c). Для цього прикладу вибрано параметр Mobile - Default.

Рисунок 1.49 – Поширені пристрої, що використовуються в поєднанні з програмним забезпеченням, що використовується

Пристрій Android було обрано головним чином через його доступність і можливість інтеграції у виробництво та умови, в яких цю технологію доводиться використовувати. Гарнітури, у 2D чи 3D, проектують безперервне зображення з послідовності в поле зору користувача. Враховуючи те, що поки що невідомий

його негативний вплив, відповідно, немає визначеного відсотка охоплення поля зору, який був би безпечним у цьому випадку, ми вибираємо пристрій, який дозволяє тимчасовий огляд, відповідно до потреб працівника. Це пристрій Lenovo M10 plus, з роздільною здатністю 1900x1200 пікселів. Ця роздільна здатність використовується як налаштування за замовчуванням для інтерфейсу користувача.

2. Студія Vuforia – створення UI

Після назви проекту відображається інтерфейс користувача програми. Перша частина програми, її двовимірна частина, яка буде видима на вибраному нами пристрої Android, показана на рис. 1.50. На цьому етапі підготовки послідовності ми адаптуємо інтерфейс користувача, змінюючи його розміри, додаючи кнопки та функції, які можуть замінити стандартні функції САПР. На рисунку 8а ми можемо побачити дизайн інтерфейсу з кнопками для запуску послідовності, скидання позиції моделей CAD, видалення попереджень і обертання всієї збірки. На рис. 1.50а, у свою чергу, показано попередній перегляд створеного таким чином інтерфейсу. [202]

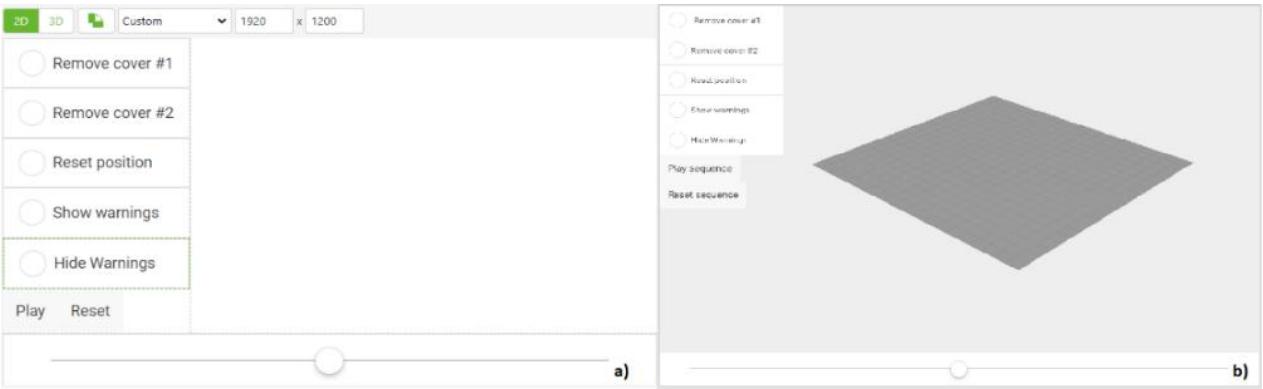


Рисунок 1.50 – Процес створення UI для програми Android AR

В кінці цього етапу слід завершальна частина. Таким чином, використання програми Vuforia studio на бек-енд налаштування послідовності, її керування та взаємодії.

3. Визначення послідовності обслуговування АР

Останній етап підготовки послідовності складається з бек-енд налаштувань, які виконуються в студії Vuforia. Це підсумок і визначення всіх попередніх кроків у складній заявці. У цьому розділі розглядаються окремі

кроки, необхідні для виконання цієї послідовності, і використовуються елементи підготовки, описаної в попередніх розділах. [203]

Етап цієї підготовки досить великий, починаючи з імпорту збірки САПР у форматі STEP, розміщення та призначення ринку, призначення функцій САПР окремим кнопкам, видимим в інтерфейсі користувача, та імпортування файлу PVI для отримання векторних даних для синхронізації та позицій моделі. в межах послідовності. Крім того, кожен із цих параметрів можна редагувати за допомогою виразу javascript. Незважаючи на те, що це спеціалізоване програмне забезпечення, функції якого зручні та інтуїтивно зрозумілі, процес досить великий. Таким чином, у наступному розділі описано необхідні для завершення послідовності. [204]

4. Призначення Thingmark певній моделі

Розташування ThingMark у Vuforia Studio безпосередньо відповідає тому, де AR Experience розміщує модель у Vuforia View. Це відповідає його повороту та розміщенню. Ми можемо або повернути Thingmark у програмі, або необхідно повернути надрукований ThingMark у потрібне положення, щоб наш додаток правильно відображався у програмі Vuforia View. [205]

На рис. 1.51 показані можливості розташування маркера. Як бачимо, існує кілька варіантів. Перше, що можна побачити на рис. 1.52а, це розташування позначки позиції в просторі. На практиці це означає, що позначка позиції буде розміщена десь на рамі фрезерного верстата, а показана модель проектуватиметься на певній відстані від неї. Цей метод підходить для використання візуалізації інтерактивних моделей САПР поверх двовимірного технічного креслення. Але через складну форму пристрою, в якому має виконуватися послідовність, він не підходить для цього рішення. Це пов’язано з тим, що маркер положення завжди повинен знаходитися в діапазоні камери пристрою виводу, що в цьому випадку спричиняє ускладнення, коли маркер положення знаходиться поза фокусом. [206]

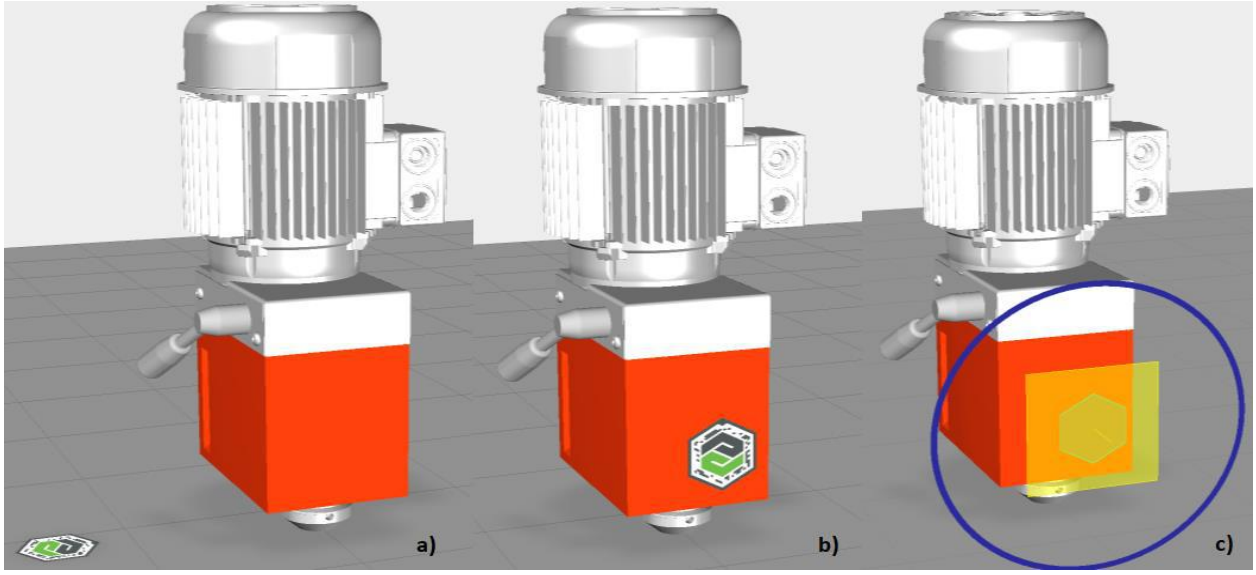


Рисунок 1.51 – Методи розміщення ThingMark для обраної моделі

Розташування позиційної позначки, показано на рис. 1.51b і 1.51c, по суті, однакові. У випадку з першим варіантом це розміщення позиційної позначки безпосередньо на приводі шпинделя. Таке розташування забезпечить нам позиційну відмітку на достатньо помітному місці та перекриття САПР моделі з реальним об’єктом. Оскільки CAD-модель була створена в масштабі 1:1, послідовність, розміщена таким чином, є ідеальною. Рис. 1.51c, по суті, є тим самим розташуванням маркера, за винятком того, що маркер позиції не видно під час відображення послідовності, це більш-менш естетичне питання, не впливаючи на бажаний результат.

На рис. 1.52 показано завантаження та призначення вже згаданого файлу PVI кнопці «Відтворити послідовність», яка відображається в інтерфейсі користувача. Оскільки це спеціалізоване програмне забезпечення, реалізація цих функцій відносно проста. Таким чином функції призначаються всім кнопкам і об’єктам, які відображаються в AR.

Результати показують розташування шпиндельного приводу фрези Emco 55 у реальному стані та з використанням послідовності для інтелектуального пристрою. Як видно на рис. 1.53, позначка позиції знаходиться на корпусі шпинделя, а модель CAD відображається безпосередньо на ньому. Таке розміщення дозволить нам співвіднести відображення в доповненій реальності та реальний світ, таким чином досягнувши меншого відсотка поля зору

співробітника. Розташування також є ідеальним щодо ходу послідовності, оскільки окремі компоненти розташовані в одному місці.

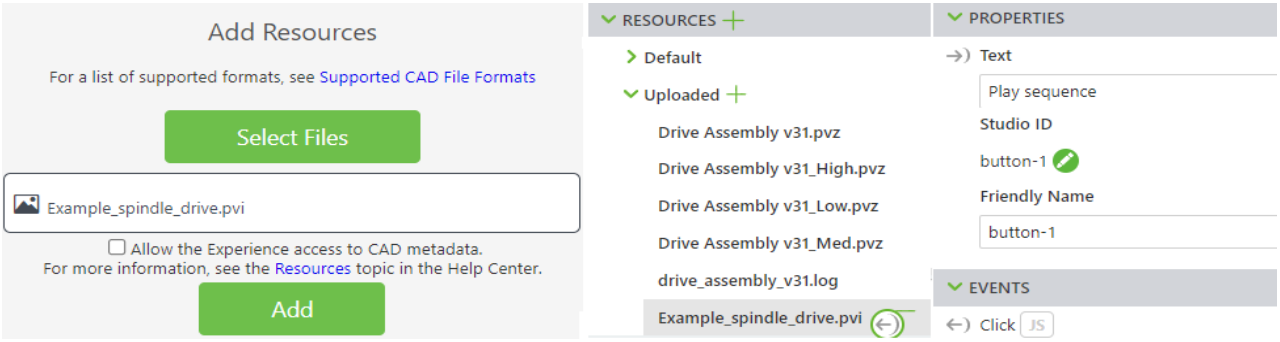


Рисунок 1.52 – Імпорт і призначення файлу PVI кнопці „Play sequence”

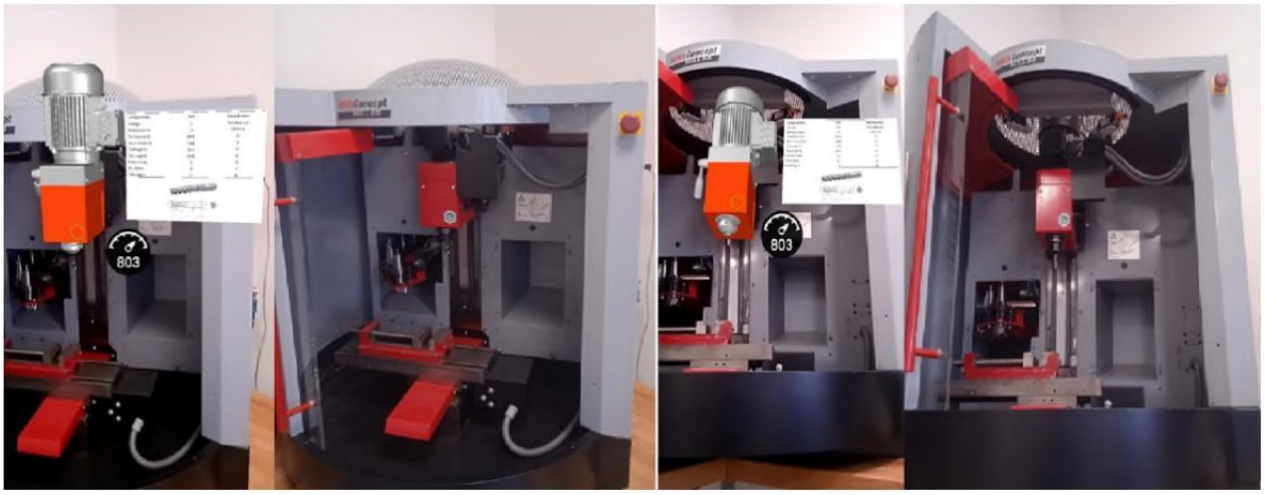


Рисунок 1.53 – Тест запуску досвіду AR на стані Emco 55

На рис. 1.53 також показано розширені функції програмного забезпечення студії Vuforia. Додавши додаткові розширення, можна інтерпретувати робочі параметри пристрою або вихідні дані діагностичних пристроїв безпосередньо в поле зору працівника. Таким чином, за допомогою цього інструменту можна досягти такої форми оперативного контролю, коли окремі величини відображаються безпосередньо в полі зору разом із попередженнями. Таким чином, ця процедура створює ідеальне середовище для використання інших елементів IoT з точки зору оперативного контролю та прогнозної діагностики з інтерпретацією результатів у AR у режимі реального часу. Рис. 1.53 також показує можливість призначення різних інших типів інформації у формі аркушів матеріалів або інформації про використовувані інструменти чи препарати.

Послідовності, створені таким чином, мають широкий спектр застосувань у різних технологіях, таких як експериментальне визначення швидкості різання за характером поверхні оброблених деталей, описаних у публікації [207]. Можливе використання цієї технології також має місце у випадку технології DMLS. [208]

1.2 Інтегрована технологія підвищення якості виготовлення деталей шляхом зменшення вібрацій при механічному обробленні

1.2.1 Підвищення ефективності тонкого розточування для ступінчастих отворів з великим діапазоном діаметрів

Основну увагу дослідники зосереджують на вивченні коливань розточувальних консольних стрижнів, встановлених на шпиндельних головках [209]. Відносні переміщення різця і заготовки (статичні і динамічні) визначають вібрації, які виникають в замкненій динамічній системі верстата і негативно впливають на досяжну точність [210]. Аналіз схеми круглих отворів розточених отворів показує, що вібрації є чинником, який визначає похибки форми поперечного перерізу та точності обробки [211, 212]. Широко використовуються консольні розточувальні штанги, що забезпечують високу продуктивність при розточуванні гладких отворів унікальними станками для чистової обробки отворів. Однак слід зазначити, що часто доводиться розточувати ступінчасті отвори. Так, за нашими підрахунками, 21 % тонкорозточувальних верстатів оснащено двоступінчатими розточувальними штангами і більше 10 % - триступінчатими. Вважається, що недостатнє використання багатоступінчастих консольних розточувальних штанг пов’язане з відсутністю необхідного обґрунтування методики проектування унікальних конструкцій розточувальних штанг і багаторізцевих головок. Одним з основних обмежень розточувальних консольних штанг є підвищена податливість фрези на згинання (технологічна податливість), що призводить до зниження їх вібростійкості. При цьому розточувальні консольні штанги також демонструють значну варіабельність

технологічної відповідності при обертанні за рахунок зміни умов контакту в підшипниках опорних пристроїв шпинделя.

Основні закономірності розвитку вимушених коливань під час багаторізцевого тонкого розточування досліджувалися в ряді робіт, наприклад у [213]. Зокрема, взаємний вплив різців, джерел віброзбудження в залежності від параметрів пружної системи верстата і процесу різання, а також досліджено залежність амплітуд коливань від співвідношення довжин і діаметрів ступенів тощо [214].

Однією з невирішених проблем, що впливають на ефективність і точність багаторізцевого розточування, є необхідність стабілізації режимів різання при обробці ступінчастих отворів зі значною різницею діаметрів у 2–3 рази. Щоб різці працювали в однакових умовах, необхідно встановити однакову швидкість різання на різних кроках. У даній роботі наведені результати експериментів, які були проведені з метою вивчення та порівняння параметрів тонкого розточування при роботі звичайних двоступеневих штанг та унікальних розточувальних штанг, які забезпечують однакову швидкість різання на різних кроках.

Багаторізні розточувальні стрижні застосовуються для розточування ступінчастих отворів за принципом зосередженості та поєднання операцій. Для підвищення продуктивності та точності обробки в цих випадках використовують ступінчасті консольні розточувальні штанги, оснащені гасителями коливань для великих звисів [215, 216]. Труднощі у прогнозуванні точності обробки пов’язані з необхідністю враховувати взаємний вплив збурень від ріжучих лез на різних етапах [217]. Досліджено залежності амплітуд вимушених коливань при зміні геометричних параметрів розточувальних штанг, від співвідношення довжин і діаметрів ступенів, а також від режимів різання [218].

Дослідження коливань консольних розточувальних штанг описано в багатьох роботах, присвячених динаміці верстатів [219, 220]. Особливістю використання консольних бурових штанг є їх обмежена жорсткість на згинання, яка характеризується відношенням l/d, де l – довжина бурильної штанги, d – діаметр. При $l/d < 3$ різання має постійну амплітуду вібрації, без підриву різця, з

високою вібростійкістю процесу різання. Так, для підвищення точності та продуктивності чистового розточування інтенсивно вивчаються характеристики жорсткості та вібростійкості [221].

Розглянемо зміст деяких досліджуваних задач динаміки процесу тонкого розточування:

1. Підвищення жорсткості довгих консольних бурових штанг (l/d > 4 - 10) [222].

2. Розвиток теорії прецизійності при тонкому розточуванні та виявлення помилок механічної обробки та надійний контроль при внутрішньому розточуванні [223].

3. Підвищення вібростійкості тонкого розточування шляхом збільшення швидкості видалення матеріалу. Максимальна точність обробки забезпечується за рахунок оптимального налаштування параметрів системи [224].

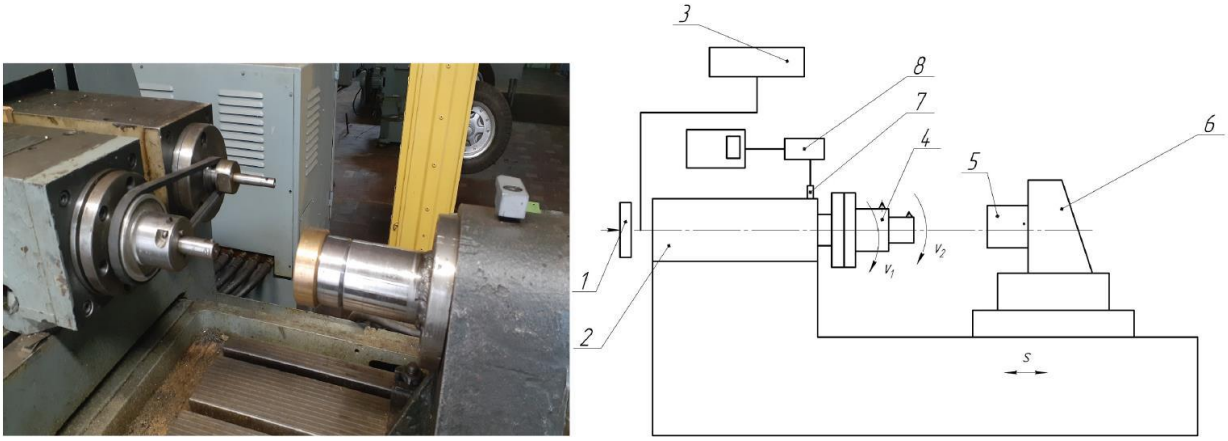
4. Вплив мастила на зниження сили різання при обробці в кріогенному середовищі [225].

Завдяки конструкції унікальних консольних дво- і триступінчастих розточувальних штанг з різницею діаметрів в 2-3 ступені, що забезпечують розточування фрезами з однаковою швидкістю різання, підвищується продуктивність і точність обробки. Проте дослідження якості розточування при такій обробці в технічній літературі практично не відображені.

Методологія дослідження.

У практиці металообробки часто доводиться свердлити ступінчасті отвори (наприклад, у дві-три ступені) зі значною різницею діаметрів. У цьому випадку оптимальна швидкість різання визначається виходячи з матеріалу і діаметра заготовки, матеріалу фрези, глибини різання, подачі і т. д. Наприклад, при розточуванні отворів Ø 100 мм і Ø 50 мм в заготовці середньовуглецевої сталі при різанні двома одночасно працюючими різцями рекомендована швидкість різання становить 200–250 м/хв для твердосплавних інструментів.

Фото та схема стенду з вимірювальною апаратурою для дослідження коливань унікальної бурильної штанги наведені на рис. 1.54 для ступенів різного діаметру.



(а) (б)

Рисунок 1.54 – Фото (а) та схема випробувального стенду (b) для розточування ступінчастих отворів при однаковій швидкості різання:
1 – тахометр; 2 – шпиндельна головка; 3 – перетворювач частоти; 4 – унікальна бурова штанга; 5 – заготовка; 6 – кріплення; 7 – п'єзоелектричний датчик; 8 – вібраційний спектроаналізатор

Щоб забезпечити однакову рекомендовану швидкість різання для ступенів різного діаметру, швидкість кожної сходинки має бути різною. Наприклад, швидкість обертання сходинки з великим діаметром повинна становити половину частоти сходинки з меншим діаметром.

Завдання реалізовано при розточуванні за допомогою унікальної розточувальної штанги (рис. 1.55), встановленої на шпиндельній бабці. Сходинка меншого діаметра 1, оснащена фрезою 5 і закріплена в шпинделі 3 розточувальної головки 15 за допомогою конічного хвостовика 16, а також сходинка великого діаметра 2, оснащена фрезою 6. Сходинка з більшим діаметром 2 має вигляд порожнистого циліндра, встановленого на сходинці меншого діаметра 1 за допомогою двох здвоєних підшипників 4, а сходинка більшого діаметра 2 має кутові канавки 7 для пасової передачі. Здвоєння підшипників з метою підвищення точності обертання бурової штанги здійснюється за допомогою розпірних втулок 8, 9 і затискної гайки 11 через кільце 10. Підшипники кріпляться кришкою 12 за допомогою гвинтів 14. Вал (не показаний на кресленні), оснащений шківами 18 різних діаметрів, встановлений у корпусі 17, щоб відповідати заданим передавальним числам.

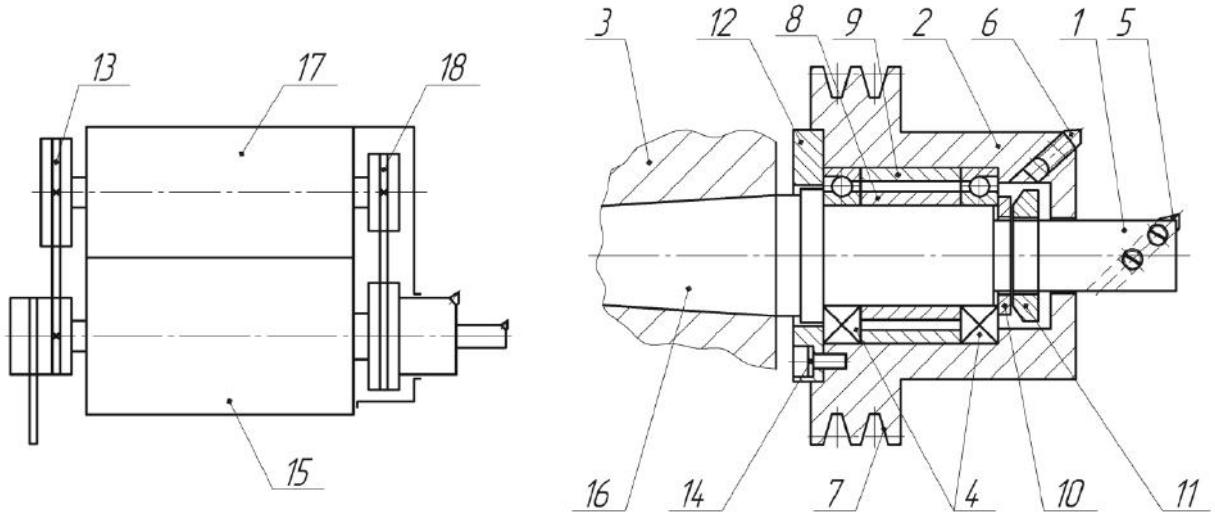


Рисунок 1.55 – Схема приводу та конструкція унікальної розточувальної штанги для розточування ступінчастих отворів з однаковою швидкістю різання

Принципова відмінність конструкції унікальної бурильної штанги від усіх відомих конструкцій полягає в тому, що сходинка меншого діаметра 1 є базовою, на якій закріплена сходинка великого діаметра 2 і має пази 7 для пасової передачі.

Це рішення забезпечує однакову оптимальну швидкість різання на обох етапах. Під час роботи сходинка з більшим діаметром 2 обертається в тому ж напрямку, що й сходинка з меншим діаметром 1.

Схема конструкції унікальної бурильної штанги наведена на рис. 1.56.

Принцип роботи унікальної розточувальної штанги полягає в тому, що фрези 5 і 6 працюють одночасно при різанні, а довжини кроків 1 і 2 відповідають довжинам оброблюваних отворів. Сходинка меншого діаметра 1 обертається зі швидкістю, яка дорівнює частоті обертання шпинделя 3 і дорівнює оптимальній швидкості різання для конкретних умов обробки. Для забезпечення однакових умов роботи фрез 5 і 6 сходинка великого діаметра 2 повертається додатковим приводом, при цьому відношення швидкостей обертання сходинки меншого діаметра 1 і сходинки великого діаметра 2 є обернено пропорційним відношенню їх діаметрів. Необхідне передавальне число встановлюється за допомогою шківів 13 і 18.

Розточували заготовки зі сталі Ст45 та чавуну СЧ40. Заготовками були циліндричні втулки з діаметром кроку 45 і 85 мм. Загальна довжина унікальної

бурової штанги становить 160 мм. Розточування проводили на глибину 0,1 та 0,2 мм. Режим різання: v = 250 м/хв в 2 прийоми; s = 0,06 мм/оберт.

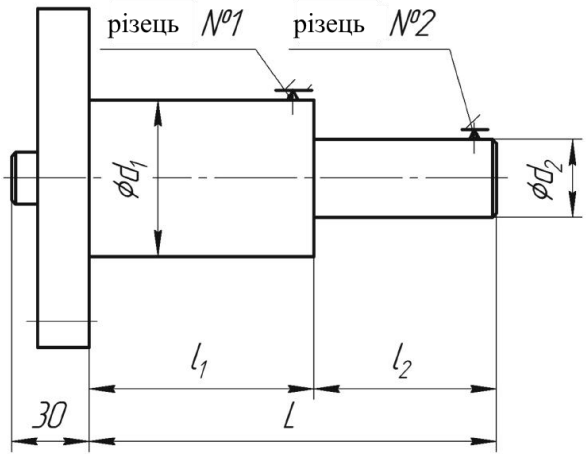


Рисунок 1.56 – Нумерація різців і їх розташування на ступенях

В дослідах використовувалися різці з твердого сплаву Т30К4 (для сталі) і БКЗ (для чавуну) з наступною геометрією:

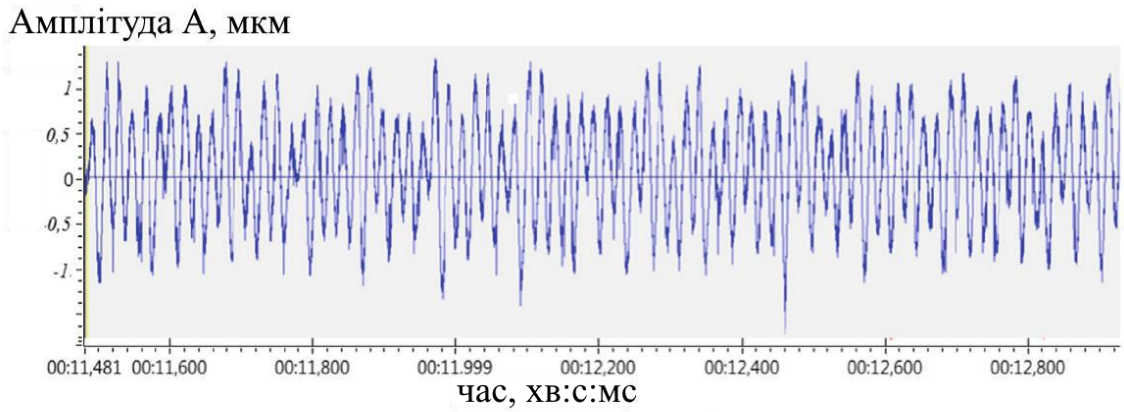
Підвищення ефективності тонкого розточування 5 для сталі - = 45°; = 15°; α = α1 = 10°; γ = - 10°; r = 0,2 мм; для чавуну - з такою ж геометрією, за винятком γ = -5; λ = 0 [18].

На рис. 1.56 показана нумерація різців і їх розташування на ступенях.

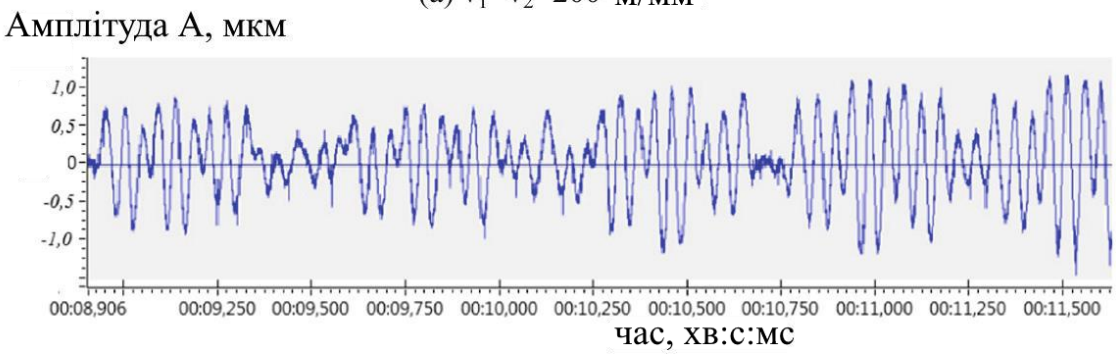
Розточування проводилось унікальною ступінчастою розточувальною штангою, яка має кроки однакової довжини 90 мм. Тоді ж увійшли в дію фрези. Визначали амплітуди коливань різців, відхилення від округлості ΔR, шорсткість поверхні Ra та знос різців (радіальний і відносний). Власну частоту унікальної бурильної штанги визначали за осцилограмами затухаючих коливань, що збуджуються ударом у перерізі на другому різці. Частота обертання змінювалася безсонно за допомогою перетворювача частоти. Кожен експеримент проводили на 10 зразках з шістьма різцями однакової геометрії. Критерієм переналаштування різців було значення шорсткості Ra > 2 мкм.

На рис. 1.57а наведено осцилограми коливань унікальної розточувальної штанги при одночасній роботі 2 фрез. Амплітуди вібрації визначали за осцилограмами та порівнювали з амплітудами вібрацій звичайної двоступеневої розточувальної штанги на рис. 1.57б. Амплітуди коливань відрізняються

несуттєво, хоча на рис. 1.57б чітко видно коливання, пов'язані з близькістю ступінчастих частот. В обох випадках значення виражені в мікронах.



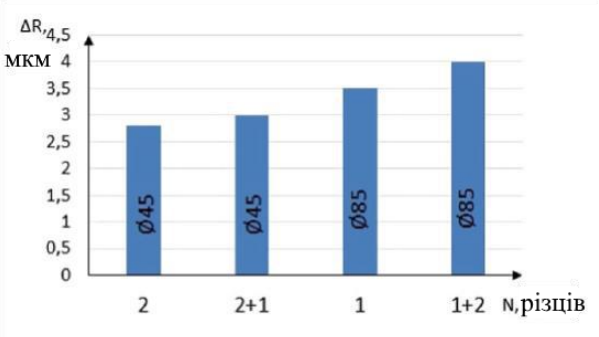
(a) $v_1=v_2=200$ м/мм



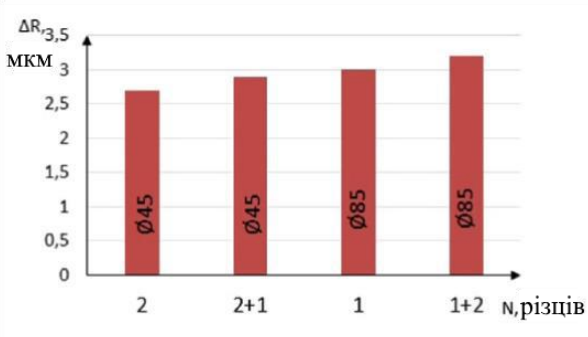
(b) $v_2=200$ м/мм

Рисунок 1.57 – Осцилограми коливань розточувальної штанги при одночасній роботі 2 фрез

На рис. 1.58 показані круглі схеми розточування двоступеневих свердловин звичайним і одноразовим розточуванням. Умови різання показані на рисунку. Вимірювання відхилення круглості проводили на вимірювальній машині TALIROUND (Японія).



Звичайна розточувальна штанга



Унікальна розточувальна штанга

Рисунок 1.58 – Діаграми залежності шорсткості поверхні отворів від кількості та послідовності різців

1.2.2 Особливості згинально-крутильних коливань консольних розточувальних штанг для тонкого розточування глибоких отворів малого діаметра

Сучасне машинобудування характеризується постійним підвищенням точності виробів з одночасним підвищенням продуктивності. Нові технологічні дослідження вимагають вирішення багатьох питань, пов'язаних з вивченням динамічних явищ, що виникають при механічній обробці. До таких задач слід віднести, наприклад, вплив динамічних взаємодій у технологічній системі на точність обробки або вплив різних режимів вібрації в зоні різання на вібростійкість верстата. Точне розточування - це вдосконалений метод обробки точних отворів за допомогою кромкового інструменту.

Консольні розточувальні штанги кріпляться на шпиндельних головках високої точності, забезпечуючи суміщення їх поздовжньої осі з віссю шпинделя. При розточуванні немає «стікання свердла», забезпечується прямолінійність осі отвору. Основними геометричними параметрами розточувальних штанг є довжина консольної частини (1) і діаметр (d). Розточувальні фрези оснащені або твердосплавними пластинами, або промисловими алмазами.

Особливості вібрації розточувальних штанг:

1) при різанні розвиваються згинальні та крутильні коливання;

2) при дії радіальної сили на різець форма статичного вигину збігається з просторовою формою згинальних коливань обертових розточувальних штанг;

3) використання розточувальних консольних стрижнів обмежене низькою радіальною жорсткістю; для вибраних умов різання та матеріалу, що обробляється, визначається кінцева відповідність різця, що забезпечує стійкість до вібрації та працездатність інструменту.

В даній роботі в оглядовій частині представлені результати дослідження коливань консольних бурильних штанг, зокрема буріння малих діаметрів (d = 10-20 мм; кришка > 3-8) глибоких отворів. Наведено експерименти, спрямовані на вивчення особливостей спільних згинально-крутильних коливань, можливості

збудження коливань зростаючого рівня; обговорено зв’язок між складовими амплітуд і частотними характеристиками згинальних і крутильних коливань.

Слід зазначити, що низька технологічна жорсткість розточувальних консолей не дозволяє якісно розточувати глибокі отвори з l/d > 4. При такій обробці відбувається втрата вібростійкості, пошкоджується різець, посилюються коливання, при цьому зменшуються коефіцієнти загасання коливань [226]. Тому багато досліджень пов'язано з вивченням коливань консольних розточувальних штанг [227, 228, 229]. За кількістю публікацій за результатами цих робіт одне з провідних місць у динаміці верстатів [230, 231].

Для підвищення жорсткості розточувальних штанг на вигин їх можна виготовляти з твердого сплаву, але вартість інструменту різко зростає [232, 233]. Іншим ефективним способом придушення коливань консольних інструментів є віброгасники [234, 235]. Гасителі коливань часто використовуються, коли необхідно виконати якісну чистову операцію тонкого точіння, не кажучи вже про розточування [236], Гасителі коливань використовуються значно частіше при чистовому розточуванні. Гасіння коливань при застосуванні динамічних гасителів призводить до зменшення статичних і динамічних похибок, зменшення зносу різця, зменшення шорсткості обробленої поверхні. Застосування гасителів коливань особливо перспективно в складних умовах обробки, особливо при розточуванні глибоких отворів малого діаметра. У цих випадках застосування віброгасителів при різанні дозволяє розширити технологічні можливості операції тонкого розточування. При цьому відомо, що чим більша додана маса, тим вища ефективність гасіння коливань. Однак його величина обмежена розмірами бурильної конструкції [237].

У [238] досліджено ефективне зниження вібрації при використанні конкретних розточувальних оправ із вбудованими сердечниками з вуглецевого волокна, які характеризуються співвідношенням l/d > 5 4-10. У [239] проведено дослідження жорсткості на згин обертової композитної консольної розточувальної штанги. Передбачено зміну амплітуд, частот і демпфування для різних технологій виробництва композитів.

У роботі [240] показано вібростійку конструкцію розточувального агрегату для обробки глибоких отворів. Для ефективного використання такого блоку розроблено систему моніторингу (датчики), систему приводу та логіку керування. Розроблено оптимальні приводи, які гасять вібрацію в двох аспектах: радіально при зміні глибини різання та напрямку швидкості.

У роботі [241] проведено теоретичні та експериментальні дослідження бурильної установки для глибоких свердловин. Модель інструменту була розроблена для обробки глибоких отворів. Модальні дослідження моделі та реального об’єкта проводили в умовах статичного та динамічного навантаження [242]. Визначено власні частоти коливань, коефіцієнти затухання [243] та амплітуди в умовах імпульсного збудження, а також динамічну жорсткість [244].

Огляд літературних джерел дозволяє зробити висновок про те, що результати досліджень коливань розточувальних консольних стрижнів широко опубліковані. Проте в технічній літературі недостатньо представлені результати досліджень зв’язаних згинально-крутильних коливань розточувальних штанг при обробці глибоких отворів малого діаметру. Також не відображено вплив зв’язності на вібростійкість, а характерні частоти та співвідношення рівнів вібрації не вивчені.

Методологія дослідження

Було проведено ряд експериментів з вивчення згинально-крутильних коливань з’єднань. Зразки виготовлені зі сталі 45 та чавуну СЧ-18. Випробовували розточувальні прутки діаметром 10, 12, 16, 20, 25 мм із коефіцієнтом l/d = 3, 4, 6, 8. Приймали рекомендовану геометрію різців. Режими різання: при розточуванні сталі - v = 120-150 м/хв, S = 0,04 мм/об, t = 0,05-011 мм; при розточуванні чавуну СЧ18 - v = 100 м/хв, S = 0,04 мм/об, t = 0,05-0,1 мм. Матеріал кромки: Т30К6 - для сталі, VKZ - для чавуну. У кожному експерименті розточування проводили набором з 3 фрез з однаковою геометрією. Критерієм переточування фрезою є відносний радіальний знос і шорсткість обробленої поверхні.

В експериментах вимірювали амплітуди коливальних переміщень різців. Ці переміщення викликані вигином у нормальному (A_y) і тангенціальному (A_z)

напрямках до розточених отворів, а також викликані крученням розточувальної штанги (A_{tors}).

Узагальнення результатів експериментальних досліджень привело до таких співвідношень складових згинально-крутильних коливань: A_z = (1,1 - 1,6)A_y, A_{tors} = (0,2 - 0,5)A_y. Власні частоти крутильних коливань в 2-8 разів перевищують частоти згинальних, які знаходяться в межах 0,4-2 кГц для розточувальних штанг діаметром менше 20 мм. Крутильні коливання характеризуються малою амплітудою, а їх вплив на згинальні коливання проявляється при малих значеннях діаметра розточувальної штанги (менше 12 мм).

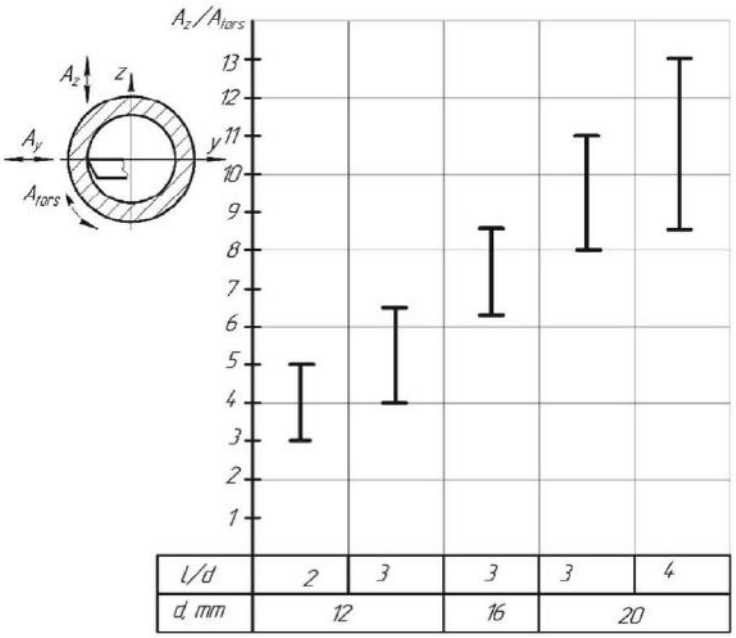
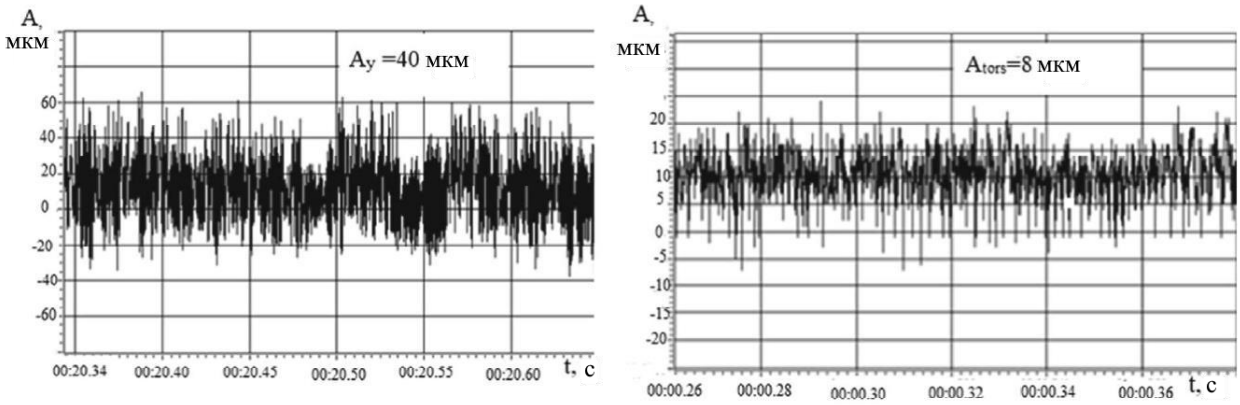


Рисунок 1.60 – Співвідношення складових згинальних і крутильних коливань A_z/A_{tors} та напрямок складових коливань.

Оскільки A_{tors} характеризує рух різця при тангенціальному розриві до поверхні отвору, що обробляється під час кручення розточувальної штанги, то для порівняння інтенсивності вібрації будемо розглядати також тангенціальну складову A_z, тобто характеризувати ці зміни за допомогою відношення A_z/A_{tors} (рис. 1.60). Підсумовуючи результати дослідів, можна зробити висновок, що при зменшенні розмірів розточувальних штанг при 1/d = const збільшення A_z відбувається менш інтенсивно, ніж збільшення A_{tors}. При зменшенні d розточувальні штанги амплітуди згинальних і крутильних коливань зростають, а

відношення A_z/A_{tors} зменшується і знаходиться в межах 4-6 при розточуванні сталі, а при d = 25 мм - 8-12.

На рис. 1.61 наведені типові осцилограми згинальних і крутильних коливань.



а) б)

Рисунок 1.61 – Осцилограми згинальних і крутильних коливань: v = 125 м/хв, d = 12 мм, 1/d = 8, t = 0,15 мм, s = 0,03 мм/об, сталь 45 а) згинальні коливання (A_y) - власна частота F_{ben} = 700 Гц; б) крутильні коливання (A_{tors}) – власна частота Ftor = 2200 Гц.

Для розрахунку амплітуд згинально-крутильних коливань розроблено розрахункову схему, складено рівняння руху, яке було досліджено на стійкість.

Схема коливальної системи наведена на рис. 1.62.

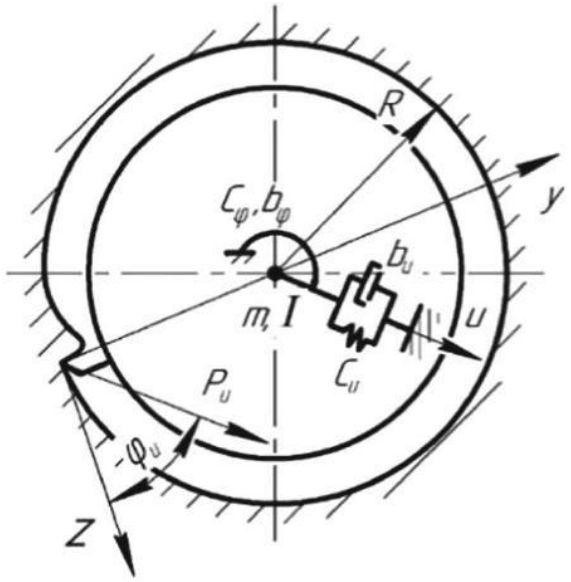


Рисунок 1.62 – Згинально-згинальні коливання при розточуванні.

Система коливань має два ступені вільності: переміщення вздовж осі u і обертання навколо осі розточувальної штанги. Напрямок осі u збігається з напрямком сили різання. Сила різання P_u вважається постійною за напрямком і утворює кут φ_u з віссю z, спрямований по дотичній до обробленої поверхні на вершині різця. Маса системи нормована до місця розташування фрези і фіксується пружинами. Одна з пружин з жорсткістю C_u діє вздовж осі u, а інша з жорсткістю перешкоджає повороту. Коефіцієнт демпфування пружини з жорсткістю C_u позначимо як b_u, а пружини з жорсткістю C_φ – як b_φ.

Конструктивний аналіз особливостей динамічної системи, що відображають взаємодію згинальних і крутильних коливань суглоба, дає можливість оцінити вібростійкість процесу розточування. Система відповідних рівнянь руху описує проектну модель, представлену на рис. 1.61:

$$\begin{aligned} &m\ddot{u} + b_u\dot{u} + c_u u = \left(\cos\varphi_u + \mu\sin\varphi_u\right)\cdot P_z, \\ &I\ddot{\varphi} + b_\varphi\dot{\varphi} + c_\varphi\varphi = RP_z, \\ &T_P\dot{P}_z + P_z = \left(-k_P\sin\varphi_u\right)u + k_S\dot{u} + k_S R\dot{\varphi}, \end{aligned} \tag{1.8}$$

де m, I – приведена маса та момент інерції, R – радіус отвору, що утворюється, μ – коефіцієнт тертя стружки по передній площині фрези, u – переміщення в напрямку коливань, що розвиваються в системі, φ - переміщення в напрямку крутильних коливань, P_z - основна складова сили різання.

Кут φ_u проектує напрямок коливань на напрямок головного руху. При швидкості V, T_P – постійна часу стружкоутворення, що характеризує інерційність процесу різання, k_s – коефіцієнт швидкості [235]. Далі, ми перейдемо до змінних:

$W = \dfrac{c_u \cdot u}{\cos\varphi_u + \mu\sin\varphi_u}$, $\tau = \omega_u \cdot t$, $\alpha = c_\varphi \cdot \dfrac{\varphi}{R}$, а до безрозмірних параметрів

$$\gamma_1 = \frac{k_P \cdot \left(\cos\varphi_u + \mu \sin\varphi_u\right)}{c_u},\ \Omega = \frac{\omega_u}{\omega_\varphi},$$

$$\beta_1 = \frac{k_S \omega_u \cos\varphi_u \left(\cos\varphi_u + \mu \sin\varphi_u\right)}{c_u},\ \beta_2 = \frac{k_S R^2 \omega_u}{c_\varphi},$$

$$k_1 = b_u \left(m c_u\right)^{-\frac{1}{2}},\ k_2 = b_\varphi \left(I c_\varphi\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

З урахуванням нових змінних і безрозмірних параметрів система рівнянь (1.8) набуде вигляду

$$\begin{aligned} &\ddot{W} + k_1 \dot{W} + W = P_z, \\ &\Omega^2 \ddot{\alpha} + \Omega \cdot k_2 \dot{\alpha} + \alpha = P_z, \\ &\theta \dot{P}_z + P_z = -\gamma_1 W + \beta_1 \dot{W} + \beta_2 \dot{\alpha}. \end{aligned} \tag{1.9}$$

Розв'язок системи (2) знаходимо як (p, c_i - деякі константи):

$$\begin{aligned} &W = c_1 e^{p\tau}, \quad \alpha = c_2 e^{p\tau}, \quad P_z = c_3 e^{p\tau}, \\ &\dot{W} = c_1 p e^{p\tau}, \quad \dot{\alpha} = c_2 p e^{p\tau}, \quad \dot{P}_z = c_3 p e^{p\tau}, \\ &\ddot{W} = c_1 p^2 e^{p\tau}, \quad \ddot{\alpha} = c_2 p^2 e^{p\tau}. \end{aligned} \tag{1.10}$$

Підставляючи розв’язок (1.10) у (1.9) після перетворень, отримаємо:

$$\begin{cases} c_1 p^2 + k_1 c_1 p + c_1 = c_3 \\ c_2 \left(\Omega^2 p^2 + \Omega k_2 p + 1\right) = c_3 \\ c_3 \left(\theta p + 1\right) = c_1 \left(\beta_1 p - \gamma_1\right) + c_2 \beta_2 p. \end{cases}$$

Потім запишемо ненульову умову розв’язку

$$\begin{vmatrix} p^2 + k_1 p + 1 & 0 & -1 \\ 0 & \Omega^2 p^2 + \Omega k_2 p & -1 \\ \gamma_1 - \beta_1 p & -p_2 p & \theta p + 1 \end{vmatrix} = 0 \tag{1.11}$$

Розкладаючи визначник (1.11), отримуємо характеристичне рівняння системи (1.9), з якого, керуючись критерієм Рауса-Гурвіца, отримуємо значення коефіцієнтів:

$$
\begin{aligned}
&a_0 = \theta\Omega^2,\\
&a_1 = \theta\Omega k_2 + \Omega^2\left(1+\theta k_1\right),\\
&a_2 = \theta + \Omega k_2 + \left(1+\theta k_1\right) + \Omega^2\left(\theta + k_1\right) - \beta_2 - \beta_1\Omega^2,\\
&a_3 = 1 + \theta k_1 + \Omega k_2\left(\theta + k_1\right) + \Omega^2\left(1+\gamma_1\right) - \beta_2 k_1 - \beta_1 k_2\Omega,\\
&a_4 = k_1 + \theta + \Omega k_2\left(1+\gamma_1\right) - \beta_1 - \beta_2,\\
&a_5 = 1 + \gamma_1.
\end{aligned}
\tag{1.12}
$$

Умови стійкості Рауса-Гурвіца мають вигляд:

$$
\begin{aligned}
&a_0 > 0,\\
&a_1 > 0,\\
&a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0,\\
&\bar{a}_1 = a_1\left(a_2 a_3 - a_1 a_4\right) - a_0\left(a_3^2 - a_1 a_5\right) > 0,\\
&\bar{a}_2 = a_4\bar{a}_1 - a_5\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5\\ a_0 & a_2 & a_4\\ 0 & a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0,\\
&a_5 \cdot \bar{a}_2 > 0.
\end{aligned}
\tag{1.13}
$$

З урахуванням значень коефіцієнтів остаточно отримуємо:

$$
\begin{aligned}
&a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0,\\
&a_1\left(a_2 a_3 - a_1 a_4\right) - a_0\left(a_3^2 - a_1 a_5\right) > 0,\\
&a_4\left[a_1\left(a_2 a_3 - a_1 a_4\right) - a_0\left(a_3^2 - a_1 a_5\right)\right] - a_5\left[a_1\left(a_2^2 - a_0 a_4\right) - a_0\left(a_2 a_3 - a_0 a_5\right)\right] > 0.
\end{aligned}
\tag{1.14}
$$

Результати

Розроблено програму для ПК для розрахунку вібростійкості за критерієм Рауса-Гурвіца. Приклад результатів розрахунку за критерієм Рауса-Гурвіца наведено в табл. 1.13.

У програмі пошук стабільних значень безрозмірних семи параметрів здійснюється за: 1) вихідними значеннями параметрів; 2) Умови стійкості Рауса-Гурвіца у вигляді системи трьох алгебраїчних нерівностей (1.14). Якщо після підстановки початкових значень параметрів усі ліві частини трьох нерівностей додатні, то розточувальний брусок стійкий. Якщо хоча б одна з лівих частин трьох нерівностей від’ємна, то робимо висновок про нестабільність при

початкових значеннях параметрів. Потім здійснюється пошук такого значення одного з параметрів (наприклад) при фіксованих значеннях інших параметрів, яке відповідає умовам стійкості. Збільшення або зменшення значення параметра виконується з певним кроком для визначення знака результатів обчислень лівих частин трьох нерівностей.

У табл. 1.10 наведено початкові конструктивні параметри розточувальних штанг. Рядки 1-7 містять значення параметрів, що забезпечують положення уставки на межі стійкості, а розрахунки наводяться послідовно, починаючи з параметра θ (перший рядок), потім параметра Ω (другий рядок), до параметра γ (сьомий рядок).

Таблиця 1.10 – Розрахунок вібростійкості розточувальної штанги d = 12 мм, l/d = 3 (t = 0,1 мм, n = 2,500 хв$^{-1}$, s = 0,03 мм/об, сталь 45).

	θ	Ω	k_1	k_2	β_1	β_2	γ	Області сталих розв'язків
Літературні дані	0,5	0,125	0,1	0,08	0,05	0,56	0,035	Немає
Номер набору констант 1	1,362	0,125	0,1	0,08	0,05	0,56	0,035	θ > 1,362
2	1,362	0,126	0,1	0,08	0,05	0,56	0,035	Ω < 0,124
3	1,362	0,126	0,11	0,08	0,05	0,56	0,035	k_1 > 0,11
4	1,362	0,126	0,11	0,085	0,05	0,56	0,035	k_2 >0,8
5	1,362	0,126	0,11	0,085	0,051	0,56	0,035	β_1 > 0,051
6	1,362	0,126	0,11	0,085	0,051	0,55	0,035	β_2 < 0,56
7	1,362	0,126	0,11	0,085	0,051	0,55	0,034	γ < 0,034

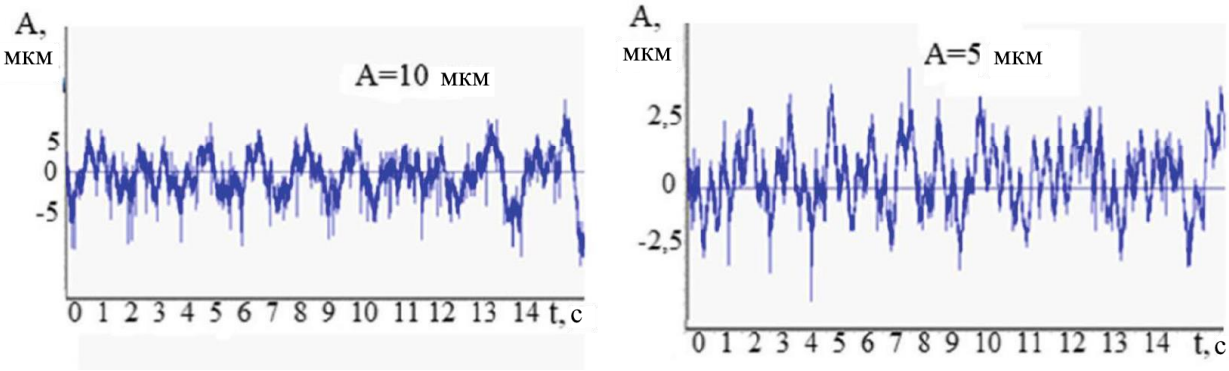
Таким чином, перший рядок містить граничне значення θ, яке гарантує, що набір констант належить до межі стабільності з постійними іншими параметрами. Подібним чином у другому рядку знайдено граничне значення Ω; в останньому стовпчику наведено значення всіх параметрів, що забезпечують область стійкості за критерієм Рауса-Гурвіца.

Критерій не дозволяє окреслити взаємний вплив мод коливань, хоча дає однозначну відповідь щодо стійкості розчинів. Вивчивши спільні згинально-крутильні коливання, можна зробити висновок, що зі збільшенням стійкості та діаметра бурових штанг зв'язок між цими модами коливань слабкий, а амплітуди згинальних коливань значно перевищують крутильні. Співвідношення A_z/A_{tof} зростає зі збільшенням діаметра бурової штанги. Результати експериментів і

розрахунків свідчать про те, що розвиток рівнів інтенсивних коливань під час розточування не залежить від збігу власних частот згинальної і крутильної форм та їх кратності. Крутильні коливання на згинальних виникають при малих діаметрах розточувальних консолей, менше 12 мм. Цей вплив визначається тим, що зі зменшенням діаметра бурової штанги коефіцієнти зв'язку згинальних коливань з PR(γ) суттєво зменшуються, а коефіцієнти зв'язку крутильних коливань (β_2) з PR зростають.

За допомогою зв'язку мод коливань досліджено вплив вимушених коливань в осьовому напрямку на коливання, нормальні до робочої поверхні. Методи вібраційного різання вивчалися в ряді робіт на основі можливості гасіння коливань однієї форми шляхом накладення коливальних коливань з певними параметрами іншої форми.

Для проведення експериментів з визначення параметрів вимушених коливань та взаємодії мод коливань розроблено вібростенд. В експериментах виявлено режими вібраційної обробки, які забезпечують значне зменшення амплітуд згинальних коливань під дією періодичних осьових збурень (рис. 1.61), причому амплітуди коливань зменшуються в 2-3 рази (рис. 1.63).



а) сталь45 б) сірий чавун СЧ18

Рисунок 1.63 – Осцилограми згинальних коливань для застосування осьових коливань: f_{ax} = 22 Гц, f_{vibm} = 20 Гц, d = 12 мм, l/d = 8, t = 0,1 мм, s = 0,03 мм/об, осьова амплітуда A_{ax} = 0,2 мм.

1.2.3 Ефективність динамічних гасників коливань для чистового розточування

Ефективність гасіння коливань можна оцінити шляхом порівняння амплітуд A_0 і A_{dam} коливань об'єкта до встановлення демпферного пристрою і з встановленим демпферним пристроєм. Відношення цих амплітуд до частоти коливань ω є коефіцієнтом ефективності демпфування $K_e(\omega) = A_0 / A_{dam}$. Гасіння вібрації є ефективним, якщо $K_e(\omega) > 1$. Коефіцієнт для характерної точки об'єкта $K_e(\omega)$ зручно визначати для аналітичного розрахунку або в польовому експерименті шляхом порівняння відповідних їй амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) і, в першу чергу, резонансних частот.

Застосування віброгасителів є найбільш актуальним для коливань нежорсткого, як правило, обертового консольного інструменту циліндричної форми з відношенням довжини до діаметра більше 3,5–4. Гасителі коливань, як правило, розміщуються в спеціальній порожнині бурильної штанги поблизу місця кріплення фрези.

Метою роботи є вивчення та порівняння характеристик різних типів гасителів коливань для визначення найбільшої ефективності тонкого розточування. Сформульовано наступні завдання дослідження: визначити вплив змінності жорсткості кріплення основної маси системи на ефективність демпфування; визначити конструктивні рішення та оптимізувати параметри гасителів коливань для тонкого розточування.

Конструктивні рішення, що використовуються для придушення вібрації в металорізальних верстатах, і їх модельні зображення можуть базуватися на наступних особливостях.

За формою проектного рішення виділяють: Пристрої та методи, що змінюють параметри пружної системи (елементи конструкції з підвищеним демпфуванням, зі зміненою масою та/або жорсткістю; використання антивібраційних покриттів). Так, розроблено демпфуючий динамічний різцетримач [245]. Для збільшення амортизаційної здатності використовуються амортизатори з міді та латуні. У дослідженні [246] ефективність демпфування

підвищується шляхом контролю в’язкості магнітореологічної рідини. Конструкція також забезпечує підвищену жорсткість розточувальної штанги. У дослідженні [247] встановлено, що хімічне покриття бурового агрегату з високовуглецевої сталі (EN31) нікель-фосфорним (Ni-P) забезпечує значне підвищення демпфірувальних властивостей бурового агрегату після термообробки. У дослідницькій роботі [248] встановлено, що використання гібридних мідно-цинкових частинок дозволяє ефективно зменшити вібрацію під час буріння.

Пристрої, що кріпляться до еластичної системи (гасителі коливань і гасителі коливань). Наприклад, деякі публікації описують вибір демпфуючого матеріалу для розточувальних штанг для зменшення зносу фрези [249]. У дослідженні [250] амортизатор удару прикріплений до опорного кронштейна для руки. Цей демпфер встановлюється в кінці хвостовика бурильної штанги і виготовлений з фосфористої бронзи.

За принципом дії навісні пристрої: Гасителі коливань з різними видами тертя [251]. Слід зазначити, що для гасіння ударів частинок використовуються різні матеріали: свинцеві кулі, сталеві кулі, скляні кулі, гранули карбіду вольфраму, свинцевий і сталевий пил, пісок [252].

Описано динамічні гасителі коливань без демпфування та з демпфуванням. Гасителі ударних коливань без демпфування і з демпфуванням. У роботі [253] експериментально досліджено конструкції трьох консольних бурових штанг, одна з яких оснащена амортизатором удару з підпружиненою ударною масою. Амортизатор забезпечив збільшення швидкості знімання металу більш ніж на 100 %. У досліджуваному процесі розточування [254] вібрації інструменту призводять до погіршення якості обробленої поверхні, прискореного зношування інструменту, утворення шуму та зменшення ресурсу верстата через велику довжину вильоту різцедержателя. Вібростійкість можна підвищити шляхом збільшення структурного демпфування системи [255].

Пристрої композиційної дії (ударно-динамічні гасителі коливань з різними характеристиками зчеплення та демпфування пружних мас). Твердосплавні прутки і прутки з демпфуванням частинками широко застосовуються в

металообробці, що дозволяє збільшити довжину консолі при розточуванні загартованої сталі [256].

Залежно від характеристик розсіювання енергії при коливаннях: сухого тертя; демпфери, які використовують зміну коефіцієнтів демпфування при використанні сухого тертя, реалізовані в [257]. Розточувальні агрегати включають шар підкладки, демпферний шар і обмежувальний шар, що покращує динамічні характеристики процесу розточування.

В'язке тертя [258] і внутрішнє тертя [259]. Комбінація різних типів тертя [255].

За кількістю елементів, що складають масу гасителя коливань, розрізняють одноелементну і багатоелементну (багатомасову) конфігурації. У металообробці використовують як одноелементні, так і багатоелементні демпфери [260]. Показано, що кількість розсіяної енергії внаслідок удару та тертя пов’язана з поведінкою демпферів частинок. Для оцінки впливу таких параметрів системи, як відношення мас, коефіцієнт відновлення, розмір контейнера та амплітуда збудження, проведено параметричні дослідження коливань.

Розточувальні штанги призначені для гасіння коливань різної просторової форми: крутильних коливань; поздовжні або поперечні коливання [261]; крутильно-поперечні та інші складні коливання.

Призначений для придушення коливань різних часових форм: детермінованих (гармонійних, періодично-імпульсних, полігармонічних) і випадкових [263].

За можливістю оптимізації налаштування в процесі роботи їх можна класифікувати як нерегульовані (пасивні) [255] і саморегульовані (активні) і керовані гасителі коливань (гасителі коливань з автоматичною зміною параметрів за допомогою систем стеження).). Розроблено розрахункові моделі для прогнозування шорсткості поверхні з урахуванням параметрів процесу різання та параметрів вібрації інструменту [262]. Ця робота стосується в основному пристроїв, прикріплених до пружної системи.

Методологія дослідження

Експериментальний стенд призначений для дослідження коливань під час розточування консольними бурильними штангами розмірами d = 25, 50 і 75 мм, l/d = 5…8 [263]. Випробувальний стенд був доповнений аналізатором спектрів для оцінки рівнів бічних гармонік. Випробування на тонке розточування проводили на зразках зі сталі 45 та чавуну СЧ (сірий чавун) 18. Режими різання: t = 0,05…0,3 мм, s = 0,05 мм/об, v = 125 м/хв – для литих. -чавун і v = 150 м/хв – для сталі. На бурильну головку UAR 26 встановлювали розточувальні штанги d = 25 мм, а на розточну головку UAR 36 d = 50 і 75 мм. Параметри регулювання демпферів змінювалися в діапазоні: діаметральний зазор 2Δ = 0,1... 1 мм, навантаження тиску диска N = 0...40 Н.

Вплив зміни параметрів системи з динамічним гасником коливань з в'язким тертям на ефективність гасіння коливань.

Підбір параметрів гасителів коливань є складним для реальних конструкцій, особливо в умовах змінних параметрів об'єкта або спектру коливань. Введемо наступні позначення: M – основна маса системи; C – коефіцієнт жорсткості пружини, що скріплює масу M з нерухомою основою; – додана маса демпфера; c – коефіцієнт жорсткості для з’єднання мас m і M; b – коефіцієнт в’язкого тертя для зв’язку мас m і M; X і x – координати мас M і m відповідно; $P\sin\omega t$ – сковуюча сила, прикладена до маси M (P – амплітуда сили, t – час); $\Omega_M = (C/M)^{1/2}$ і $\Omega_m = (c/m)^{1/2}$ – власна частота коливань мас M і m відповідно; $\mu = m/M$ – коефіцієнт маси заслінки; Δ – односторонній зазор між m і M; $v_M = \omega/\Omega_M$ і $v_m = \omega/\Omega_m$ – безрозмірні частоти; $\chi_M = X/X_{CT}$ – безрозмірна амплітуда маси M; $\chi_m = x/X_{CT}$ – безрозмірна амплітуда маси m.

Розглянемо гасіння коливань об'єкта за допомогою демпфера, жорсткість якого змінюється відносно середнього значення C_0 за гармонійним законом з подвоєною частотою $2p$, що відповідає, наприклад, частоті обертання інструменту. Коливання гасителя коливань описуються рівняннями (рис. 1.64):

$$\begin{aligned} &Md^2X/dt^2 + CX + c(X - x) + b(dX/dt - dx/dt) = P\sin\omega t \\ &md^2x/dt^2 + c(x - X) + b(dx/dt - dX/dt) = 0 \end{aligned} \qquad (1.15)$$

де $C = C_0 + \delta_C \sin 2pt$, а δ_C – амплітуда відхилення жорсткості від середнього значення C_0.

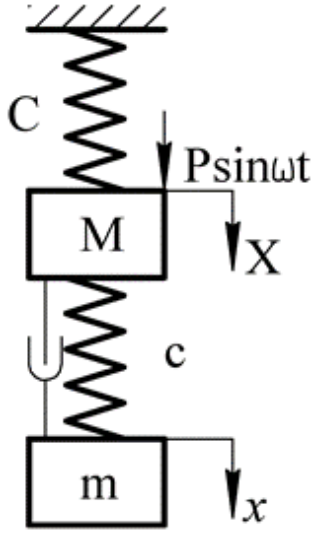


Рисунок 1.64 – Розрахункова модель

У випадку регулярних частот обертання, характерних для розточних штанг p, які на порядок менші за частоти Ω_M (1.15), рівняння можна розв'язувати без урахування параметричних ефектів. Тому ми обмежимося нашими діями знаходженням амплітуд χ_M з жорсткістю C у вигляді $C = KC_0$, де фактор K може приймати значення відповідно до конгруентності

$$K = 1 + \left(\delta_C / C_0\right) \sin 2pt \tag{1.16}$$

Потім $v_M{}^2 = K^{-1} v_{M0}{}^2$, де $v_{M0}{}^2 = \omega^2 M / C_0$.

Це дозволяє записати розв'язок системи як

$$\chi_M{}^2 = \left[\left(1 - v_m{}^2\right)^2 + 4\beta^2 v_m{}^2\right] \Big/ \left\{\left[\left(1 - v_m{}^2\right)\left(1 - K^{-1} v_{M0}{}^2\right) - \right.\right.$$
$$\left.\left. - \mu K^{-1} v_{M0}{}^2\right]^2 + 4\beta^2 v_m{}^2 \left[1 - K^{-1} v_{M0}{}^2 (1 + \mu)\right]^2\right\}. \tag{1.17}$$

Результати чисельних розрахунків значень $\chi_M(v_M)$ для випадку оптимального налаштування та значення маси демпфера $\mu = 0.1$ наведено на рис.

1.65. Дані наведено для трьох положень демпфера відносно осей жорсткості: $K = 1.0$; $K = 1.1$; $K = 0.9$, що відповідає відхиленням від Co на 10 % $(\delta = \pm 0.1)$.

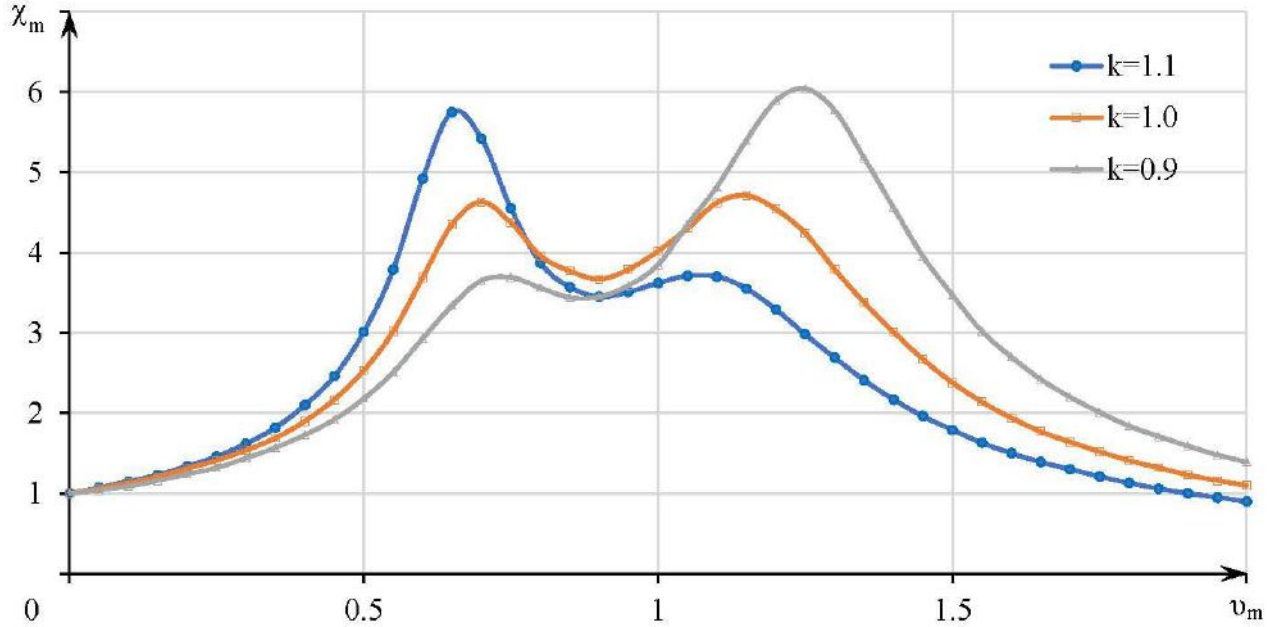


Рисунок 1.65 – Амплітудно-частотні характеристики відхилень значень жорсткості об’єкта

Відхилення основної жорсткості системи від середнього значення суттєво впливають на висоту піків графіка, які відповідають коливанням, близьким до власних частот системи; амплітуди коливань на резонансній частоті $v_{M0} = 1$ не є найменшими в жодному з трьох випадків жорсткості; найбільша ефективність демпфування відповідає частотам, нижчим від $v_{M0} = 1$ (для розглянутого прикладу близьким до $v_{M0} = 0.9$).

Розміри доданої маси обмежені конструкцією інструменту. Тому зазвичай масу демпфера приймають рівною 10-15% від маси бурової штанги. У порівнянні з приведеною до фрези масою М системи пружний шпиндель-розточувальний стрижень така маса демпфера характеризується коефіцієнтом μ, значення якого змінюються від 0,1 до 0,5 і більше залежно від розмірів розточувального стержня. Розрахунки ефективності гасіння коливань показують, що збільшення маси гасіння вище μ = 0,1 - 0,15 незначно збільшує ефективність гасіння.

За принципом дії конструкції одноелементних гасителів (рис. 1.66а) можна віднести до гасителів удару без загасання або загасання при заповненні зазору

рідиною або газом. Розмір зазору, ударна жорсткість і характеристики в'язкості оптимізовані для цих типів амортизаторів. Осьове пружне скорочення маси (рис. 1.66б) перетворює цей демпфер в ударно-динамічний демпфер з можливістю зміни жорсткості пружини. При заповненні зазору гумою, полівінілхлоридною пастою або іншими матеріалами (рис. 1.66в) виникає пружно-в'язке зчеплення маси і змінюється принцип дії демпфера. Демпфер стає динамічним демпфером із взаємопов’язаними пружно-в’язкими характеристиками, які неможливо оптимізувати окремо. Багатоелементний демпфер на рис. 3в, на відміну від показаного на рис. 1.66г, має ще один спосіб підвищення ефективності: шляхом пошуку оптимальної кількості n елементів у формі дисків. Демпфер на рис. 1.66д, подібний до моделі Kennametal, є ударно-динамічним, і його ефективність залежить від зазору, жорсткості та навантаження тиску мас.

Ударно-динамічний демпфер на рис. 1.66е дозволяє окремо оптимізувати пружно-в’язкісні характеристики з’єднань окремих елементів. Між дисками розміщені еластичні прокладки 1, покриті в'язкою речовиною (вузол А на рис. 1.66), а для утримання цієї в'язкої речовини передбачені кільцеві канавки 2. В ударно-динамічному демпфері (рис. 166ж) маси розділені жорсткими перегородками, які виключають пряму взаємодію між ними.

Ефект демпфування коливань істотно залежить від характеристики ударного імпульсу. Для підвищення ефективності удару вектор ударного імпульсу повинен бути узгоджений з віссю симетрії диска та його центром ваги. Для цього ударна поверхня диска розташована в середній частині циліндричної поверхні диска і виконана у формі кільцевого виступу (рис. 1.66з). Форма поперечного перерізу виступу, яка впливає на розміри контактної площі під час удару (варіанти форми виступів наведені для вузла Б на рис. 1.66), підбирається експериментально за ефективністю демпфування коливань. . Як показали описані нижче експерименти, віброгасник з такими дисками характеризується широкими можливостями оптимізації та високою ефективністю.

Ударно-динамічне демпфування може бути посилене в конструкціях демпферів, де виключена можливість довільних плоских переміщень дисків, а диски можуть рухатися тільки в напрямку сили різання.

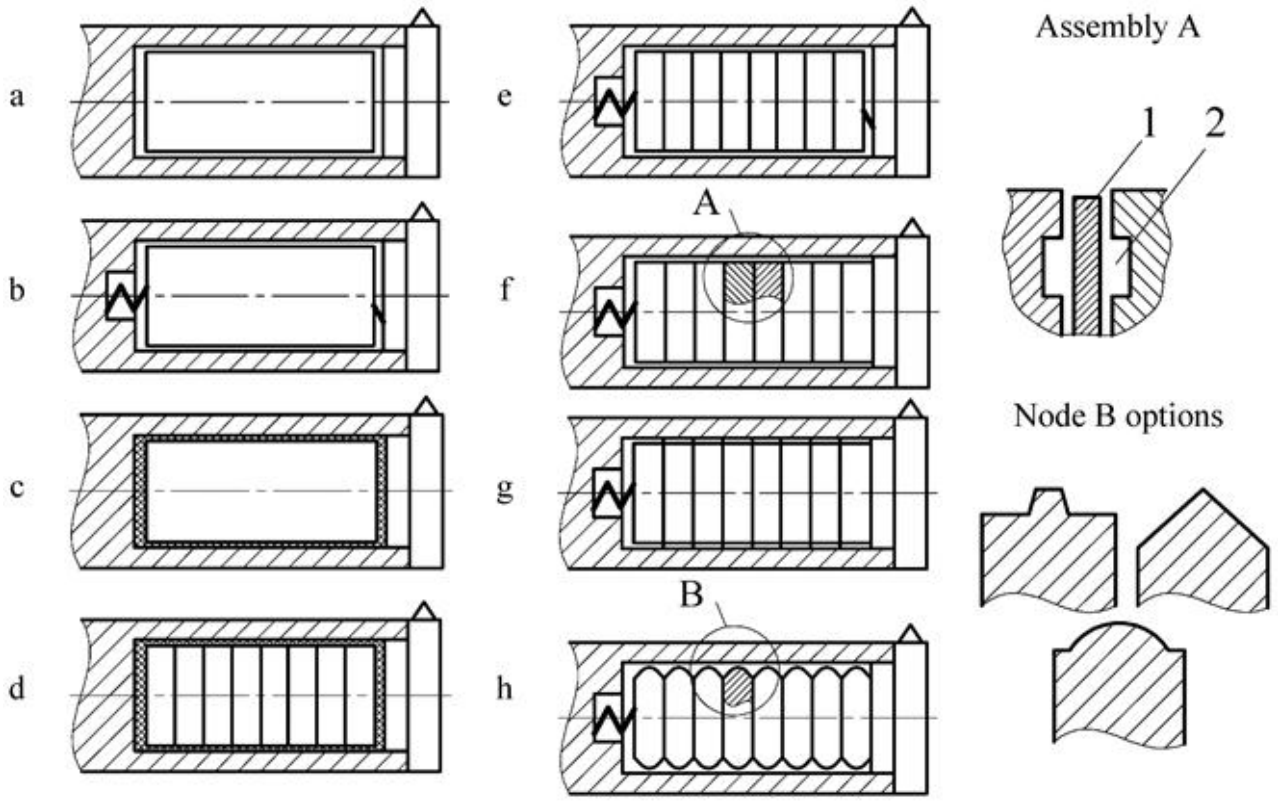


Рисунок 1.66 – Типи гасителя коливань консольних інструментів:
а – удар; б – ударно-динамічний; в – динамічний із затуханням;
г – багатоелементний динамічний із загасанням; д – багатоелементний ударно-динамічний; е – багатоелементний ударно-динамічний з оптимізацією пружно-в'язкого зв'язку між елементами; ж – багатоелементний ударно-динамічний з жорсткими перегородками між елементами; з – ударно-динамічний з оптимізацією ударних характеристик

Результати та їх обговорення

Результати оцінки впливу числа n елементів на ефективність демпфування свідчать про немонотонність такої залежності. Демпфер, встановлений на різних розточувальних штангах з оптимальним числом $n_{opt} = 8$, зменшує амплітуди при різанні в 3-5 разів порівняно з одноелементним.

При дослідженні частотних характеристик ефективність вимірюється коефіцієнтом корисної дії $K_e(A_{\max})$, який є не функцією частоти ω, а функцією максимальних амплітуд коливань системи без демпфера $A_{0\max}$ і з демпфером $A_{dam\max}$:

$$K_e\left(A_{\max}\right) = A_{0\max} / A_{dam\max} \tag{1.18}$$

Відповідно до збільшення коефіцієнта $K_e\left(A_{\max}\right)$ при спільному зміні діаметрального зазору 2Δ та зусилля N для стиснення диска встановлені оптимальні значення цих параметрів (рис. 4) для динамічного гасителя коливань типу е: $2\Delta_{opt} = 0{,}3$ мм і $N_{opt} = 6{,}5$ Н. Можна спостерігати, що поблизу оптимуму (точка Opt.) ефективність дещо змінюється, коли параметри відхиляються від оптимуму. Це створює сприятливі умови для роботи багатоелементних гасителів коливань.

Для дослідження гасителів коливань під час різання використовували також коефіцієнт корисної дії $K_e(C^{lim})$, який є функцією граничних жорсткостей системи без гасителя C_0^{lim} і з гасником C_{dam}^{lim}:

$$K_e\left(C^{\lim}\right) = C_0^{\lim} / C_{dam}^{\lim} \tag{1.19}$$

Жорсткість змінювалася шляхом зміни довжини бурової штанги, а граничні значення встановлювалися згідно з методикою [266]. Результати експериментів по зміні розточувального зазору показали практично повний збіг оптимального значення $2\Delta_{opt} \approx 0{,}3$ мм із зазором, визначеним за АЧХ. В дослідах визначено оптимальні значення сили стиснення диска N=6,4 Н.

Результати експериментів по зміні розточувального зазору показали практично повний збіг оптимального значення $2\Delta_{opt} \approx 0{,}3$ мм із зазором, визначеним за АЧХ.

Графіки значень K_e – ефективності гасителів коливань різних типів (рис. 1.68), побудовані за амплітудно-частотними характеристиками $A_{0\max} / A_{dam\max}$ та граничними розточувальними жорсткостями $C_0^{\lim} / C_{dam}^{\lim}$, характеризують потужності динамічних гасників коливань (ДГК) з різних точок зору.

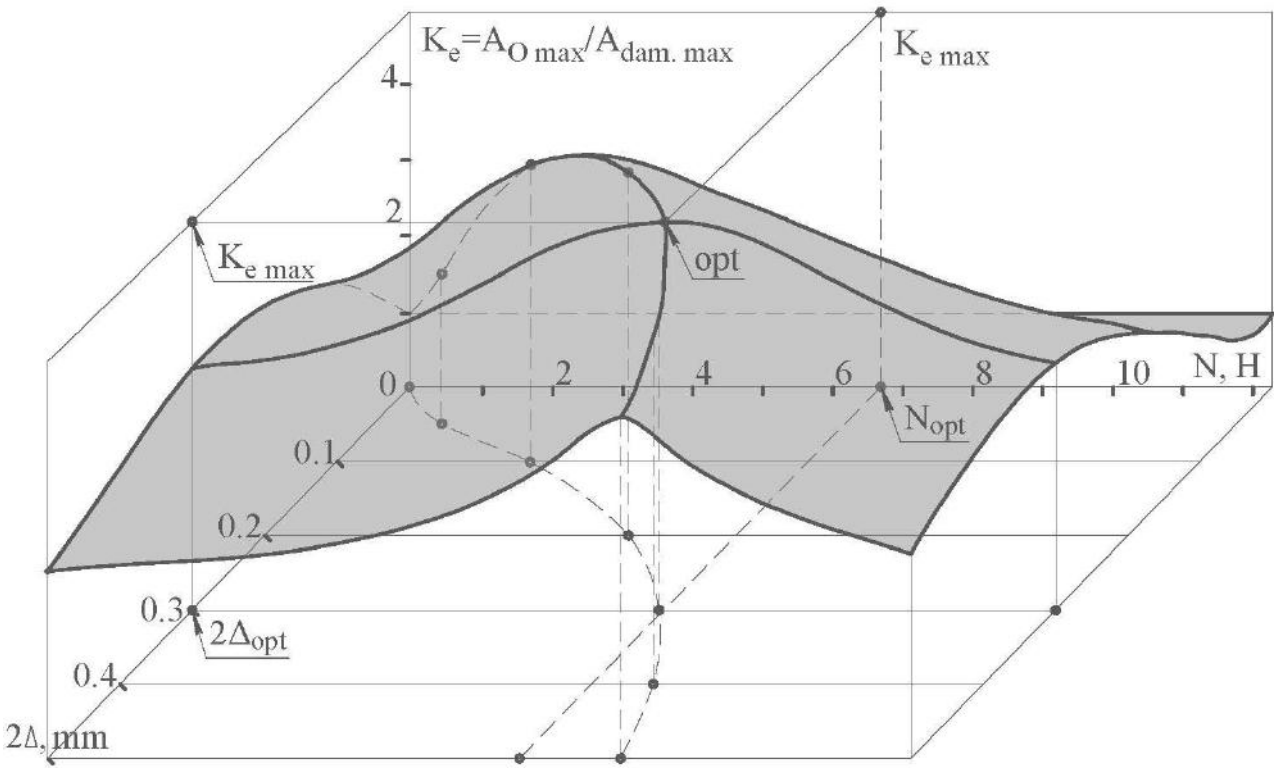


Рисунок 1.67 – Вплив діаметрального зазору 2Δ та тиску N на ефективність динамічного демпфера коливань типу е

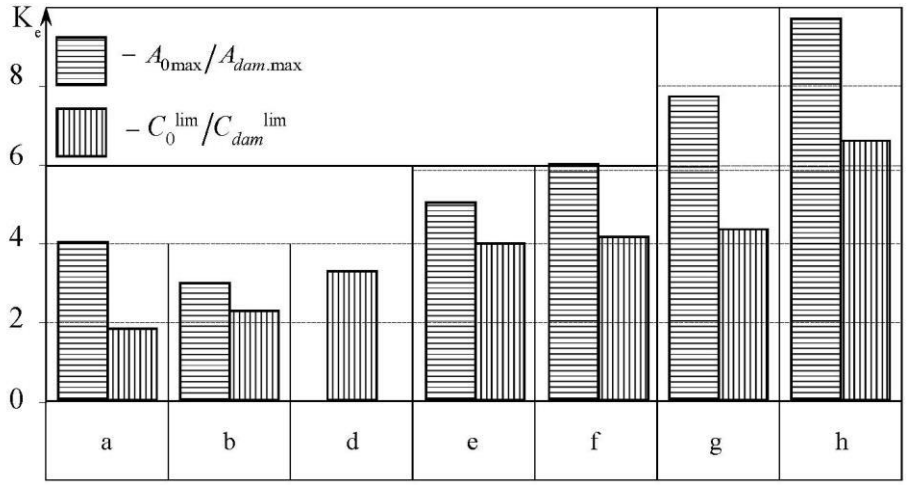


Рисунок 1.68 – Порівняння ефективності різних типів заслінок за рис. 1.66

1.2.4 Оптимізація шорсткості поверхні на основі параметрів точіння та геометрії вставки

Для отримання заготовок з необхідною конфігурацією і характеристиками необхідно використовувати ряд різноманітних операцій обробки. Механічна обробка – це складний фізико-хімічний процес, який має відповідати

різноманітним вимогам, таким як якість, надійність, продуктивність, рентабельність, гнучкість тощо, при цьому численні контрольовані та неконтрольовані фактори впливають на ефективність вихідних параметрів механічної обробки [264, 265, 266].

Токарна обробка є однією з найважливіших і найбільш широко використовуваних операцій обробки в промисловості. Його можна виконувати на різних верстатах, використовуючи різні види різальних інструментів і пристосувань. Заготовки можуть піддаватися чорновій і чистовій точці. Існує велика кількість геометрій заготовок, які можна перетворити на фінішні розміри. Мета фінішного точіння полягає в тому, щоб уникнути або зменшити додаткову механічну обробку, що дозволяє зменшити витрати та ефективність часу. Отримана шорсткість поверхні є не тільки одним з найважливіших параметрів щодо оцінки якості, але також впливає на продуктивність оброблених деталей, що робить її одним із показників якості, які найчастіше вказують покупці. Хороша якість поверхні так само важлива, як і точність розмірів, геометричні допуски та специфікація продукту. Шорсткість поверхні в основному залежить від властивостей матеріалу заготовки, властивостей ріжучого інструменту, характеристик пристосування, параметрів обробки та умов обробки. Механізм утворення шорсткостей також залежить від багатьох факторів, які важко контролювати, що не дозволяє розробити комплексне вирішення цієї проблеми. Через їхню стохастичну природу практично неможливо охопити всі вхідні змінні. Завжди можна частково підійти до вирішення цієї проблеми, але перевагу слід віддати комплексному вирішенню. Токарною обробкою обробляють заготовки з різних матеріалів, серед яких переважають сталі. AISI 1045 є однією з часто використовуваних сталей. Відрізняється хорошою оброблюваністю і високою міцністю. Його типове застосування включає шестерні, штампування, гарячу осадку, вали, осі, болти, шпильки, шестерні, ролики, опорні пластини тощо.

Багато дослідників аналізували шорсткість поверхні, що виникає під час точіння сталі AISI 1045. Наприклад, Нурдін та ін. [267] використовували RMS для прогнозування шорсткості поверхні. Шорсткість поверхні зростала зі

збільшенням подачі та зменшенням швидкості. У міру збільшення кута бічної ріжучої кромки шорсткість спочатку зменшувалася, а потім збільшувалася. Бхаттачарія та ін. [268] використали дизайн Тагучі та ANOVA для визначення внеску швидкості різання, подачі та глибини різання в шорсткість поверхні. Результати показали значний вплив швидкості різання на шорсткість поверхні. Хван та Лі [269] представили дослідження MQL (мінімальна кількість мастила) і процесів мокрого точіння з метою прогнозування шорсткості поверхні. Вплив швидкості різання та швидкості подачі був домінуючим, тоді як вплив глибини різання був відносно невеликим. Швидкість різання та швидкість подачі показали нелінійну залежність від шорсткості поверхні. Швидкість різання та глибина різання показали протилежний вплив на шорсткість поверхні. Точіння MQL дало кращу шорсткість поверхні порівняно з мокрим точінням. Естівз Корейя та Пауло Давім [270] порівняли вплив геометрії пластин на шорсткість поверхні. Значення шорсткості поверхні значно збільшувалися зі швидкістю подачі та дещо зменшувалися зі швидкістю різання. При вищих подачах токарна обробка звичайними пластинами давала більш високі значення шорсткості поверхні в порівнянні зі стираючими пластинами. Колі та ін. [271] розробили нечітку модель для прогнозування шорсткості поверхні. Шорсткість поверхні покращилася зі зменшенням подачі, зменшенням глибини різання та збільшенням швидкості різання. Використовуючи метод Тагучі, Сензілкумар і Таміжарасан [272] проаналізували вплив геометричних параметрів ріжучої пластини (форми різальної пластини, радіуса кута, кута рельєфу) на шорсткість поверхні. Вони повідомили про високий рівень взаємодії між геометричними параметрами конкретної пластини ріжучого інструменту, відзначивши виражений ефект взаємодії між формою пластини та радіусом кута. Дисперсійний аналіз показав, що форма ріжучої пластини була найбільш значущим параметром, за яким слідував радіус кута, тоді як вплив рельєфного кута був незначним. Сензілкумар та ін. [273] досліджували вплив параметрів обробки та кута підходу на шорсткість поверхні. Вони поєднали сірий реляційний аналіз і техніку нечіткої логіки з метою оцінки. Вони виявили, що шорсткість поверхні покращилася зі зменшенням подачі, глибини різання та кута

наближення. Збільшення швидкості різання покращило шорсткість поверхні до певної точки, після чого вона почала погіршуватися. Сяо та ін. [274] вивчали вплив швидкості шпинделя, подачі та глибини різання на шорсткість поверхні. Згідно з їхніми результатами, шорсткість поверхні зростала зі збільшенням подачі. Збільшення швидкості обертання шпинделя призвело до початкового збільшення шорсткості поверхні з наступним її зменшенням, тоді як збільшення глибини різання призвело до початкового зменшення шорсткості поверхні з наступним її збільшенням. Дисперсійний аналіз показав, що корм мав великий вплив на шорсткість поверхні. Аббас та ін. [275] оцінили вплив швидкості різання, глибини різання, подачі та радіуса кута на шорсткість поверхні за допомогою методу Тагучі, ANOVA та RSM. Вони відзначили, що збільшення подачі та глибини різання погіршило якість поверхні, тоді як більша швидкість різання та радіус кута сприяли її покращенню. Кімах та ін. [276] проаналізували вплив швидкості різання, подачі та радіуса кута на шорсткість поверхні, виявивши, що шорсткість поверхні покращується зі збільшенням швидкості різання, але на неї негативно впливає швидкість подачі. Хоча радіус кута мало впливав на шорсткість поверхні, він сильно впливав на вплив подачі та швидкості різання на шорсткість поверхні. Масуді та ін. [277] досліджували вплив положення сопла, твердості заготовки та типу інструменту на якість поверхні. Результати показали, що системи змащення мають значний вплив на рельєф поверхні. Система MQL значно зменшила шорсткість порівняно з сухою та мокрою обробкою. Монтілла-Монтака та ін. [278] порівнювали оброблюваність при звичайній обробці та обробці за допомогою імпульсного струму. Шорсткість поверхні була найнижчою для найменшого переміщення, високої швидкості та малого переднього кута під час використання електроімпульсів. Раджа та ін. [279] проаналізували вплив необроблених і глибоко кріогенно оброблених інструментів на шорсткість поверхні, використовуючи логіку нечіткого висновку та метод Тагучі. Результати показали, що шорсткість поверхні зменшилася при вищому рівні швидкості та глибини різання, а також при меншому рівні подачі. Кампосеко-Негрете та Кальдерун-Н'єра [280] оптимізували процес токарної обробки за допомогою

методології поверхні відгуку та аналізу бажаності. Шорсткість поверхні була нижчою для зменшеної подачі, швидкості різання та глибини різання. Аббас та ін. [281, 282] оптимізовано параметри обробки та умови охолодження (сухе, вологе, MQL) для мінімальної шорсткості поверхні. Вони повідомили, що шорсткість поверхні покращилась із зменшенням подачі, глибини різання та швидкості різання із застосуванням стратегії охолодження MQL. Дзянг та ін. [283] представили метод оптимізації параметрів різання, враховуючи компроміс між викидами вуглецю, шорсткістю поверхні та часом обробки. Кількість викидів вуглецю та шорсткість поверхні виявилися обернено пропорційними. Така ж залежність спостерігалася між шорсткістю поверхні та часом обробки. Екуетер та ін. [284] представили результати дослідницького дослідження впливу зносу бокової поверхні інструменту на шорсткість поверхні. Була виявлена значуща кореляція між шорсткістю поверхні та зносом боків ріжучого інструменту. Абіді [285] виконав метод Тагучі та ANOVA аналіз для визначення впливу параметрів точіння на шорсткість поверхні. Результати показали, що збільшення подачі призводить до збільшення шорсткості поверхні, тоді як збільшення швидкості різання трохи покращує якість поверхні. Паезе та ін. [286] провели експериментальне дослідження на основі методів ANOVA та RSM, щоб визначити, як такі фактори, як швидкість різання, подача, глибина різання, радіус кута, підкладка та метод покриття впливають на якість поверхні. Пластини з PVD-покриттям у поєднанні з меншою подачею та більшим радіусом кута створили найменшу шорсткість поверхні. Віджая Ганеса Велан та ін. [287] досліджували вплив параметрів повороту та охолоджуючої рідини під високим тиском на шорсткість поверхні. Результати показали меншу шорсткість поверхні при збільшенні швидкості різання, тоді як більші подачі призвели до збільшення шорсткості поверхні. Застосування охолоджуючої рідини під більш високим тиском значно зменшує шорсткість поверхні. Абдулатіф і Таха [288] повідомили про використання методів комп’ютерного зору та підсвічування для визначення шорсткості поверхні заготовки за різними параметрами процесу. Порівняння показало, що метод візуалізації забезпечив точні та послідовні результати порівняно з традиційним методом стилуса. Сзкзоткарз та ін. [289] порівнювали

три типи покриттів, нанесених методом PVD на вставку з спеченого карбіду (TiN, TiAlN і TiC). Вони показали, що для пластини з покриттям TiAlN менша шорсткість поверхні спостерігалася при нижчих швидкостях різання та вищих подачах, тоді як для пластини з покриттям TiC вищі швидкості різання призводять до меншої шорсткості поверхні. Вукеліч та ін. [290] змодельований процес токарної обробки з постійною силою різання за допомогою ANN. Вони повідомили, що шорсткість поверхні спочатку покращується, а потім погіршується зі збільшенням сили різання, часу різання та кількості обертів. Су та ін. [291] розробили моделі прогнозування шорсткості поверхні з урахуванням еволюції зносу інструменту. Вони використовували глибину різання, подачу, швидкість шпинделя та знос бокової сторони інструменту як вхідні змінні, тоді як ортогональні експериментальні результати використовувалися як навчальні точки для встановлення моделей прогнозування на основі алгоритму опорної векторної регресії. Їхні результати показали, що моделі, засновані на параметрах різання та зносі інструменту, мають вищу точність прогнозування, ніж моделі прогнозування, засновані виключно на параметрах різання.

Цей огляд показує, що для дослідження проблеми шорсткості поверхні використовувалися різні методи та техніки. Будучи основою наукових досліджень, експериментальний підхід все більше доповнюється моделюванням та оптимізацією. Дизайн експерименту, ANOVA, RMS, Тагучі, SVR і штучний інтелект широко використовуються для скорочення витрат і часу експериментальних досліджень, дозволяючи при цьому точно прогнозувати шорсткість поверхні. Крім того, розробка прогнозних моделей для шорсткості поверхні є основою оптимізації на основі різних критеріїв. Саме для токарного процесу найчастіше використовуються методи і прийоми ШІ. Ці методології мають свої порівняльні переваги та недоліки. З іншого боку, більшість із них страждають від обмежень та ідеалізацій, які сприяють помилкам, що підкреслює важливість експериментальної перевірки отриманих результатів.

Аналіз попередніх досліджень показує, що існують численні складні взаємодіючі фактори, які впливають на кінцеву якість поверхні, отриманої токарною обробкою. Можна визначити певні фактори, які, як правило, є

найважливішими для зменшення шорсткості поверхні. Поєднання малої подачі [292] і кутового радіуса [293], а також ефективного охолодження та змащування [294], як правило, призводить до гарної якості поверхні. Більше того, використання склоочисних поворотних вставок замість їх звичайних аналогів також дає гарну готову поверхню [295]. Мінімізація вібрації також покращить шорсткість поверхні [296]. Незважаючи на попередні дослідження, явища, які відповідають за формування шорсткості поверхні, все ще недостатньо вивчені через їх дуже складну та взаємопов'язану природу, тоді як інші фактори можуть впливати на якість поверхні в обох напрямках, таким чином все ще утримуючи нас від комплексного рішення проблеми. Інтеграція більшої кількості вхідних факторів у моделі має потенціал для підвищення їх точності, особливо у випадку чистового точіння, де вплив суми змінних є особливо вирішальним.

Метою цього дослідження є створення моделі для прогнозування та оптимізації шорсткості поверхні, яка була б застосовна в більш широкому масштабі, одночасно зменшуючи витрати на експерименти. Важливим кроком до ефективного планування виробництва, вибору параметрів режиму обробки та ріжучого інструменту є розробка достатньо точної емпіричної моделі. Крім того, у реальному промисловому застосуванні така емпірична модель мінімізує помилки, тобто дефекти та переробку, уникаючи при цьому непотрібних витрат через підвищення якості поверхні вище необхідного рівня. З метою дослідження, моделювання та оптимізації чистового точіння сталі AISI 1045 автори розглянули комплексний набір вхідних факторів, включаючи не лише параметри обробки, але й геометрію різального інструменту. Для цього дослідження було вибрано сім незалежних змінних, з яких три стосуються механічної обробки (швидкість різання, подача, глибина різання), а решта чотири описують геометрію ріжучого інструменту (радіус кута, передній кут, кут нахилу, кут наближення). Результати, отримані на основі статистично організованого експерименту, повинні бути використані для побудови емпіричної моделі, яка найкраще дозволяє моделювати процес, з метою мінімізації шорсткості поверхні в результаті чистового точіння.

Матеріали та методи

Методика дослідження схематично представлена на рис. 1.69.

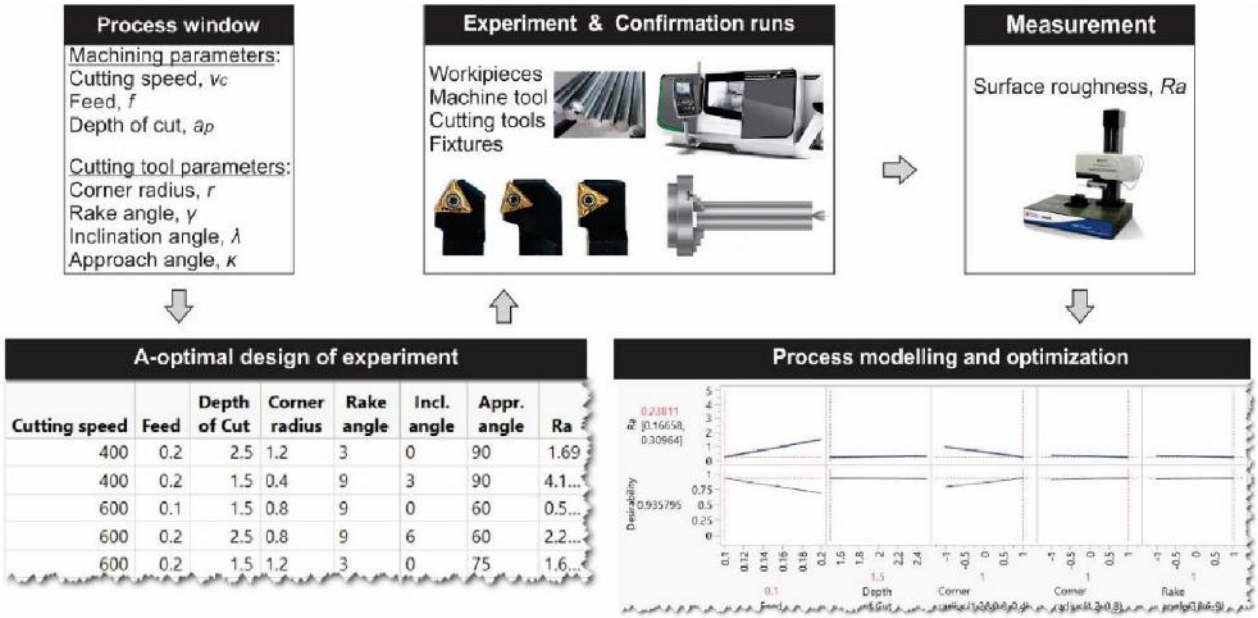


Рисунок 1.69 – Методологія дослідження

Досліди проводили із заготовками розмірами Ø 40 × 400 мм зі сталі AISI 1045. Хімічний склад сталі AISI 1045 наведено в табл. 1.11, а механічні та фізичні властивості – у табл. 1.12.

Таблиця 1.11 – Хімічний склад вуглецевої сталі AISI 1045

Елементи	**Вміст (%)**
Вуглець, C	0,43-0,50
Магній, Mn	0,60-0,90
Сірка, S	0,05 (max)
Фосфор, P	0,04 (max)
Залізо, Fe	сбалансований

Чистове поздовжнє точіння виконувалося на токарному верстаті з ЧПК (Dmg Mori Seiki CTX 510 Ecoline), який відрізняється економним енергоспоживанням, чудовою жорсткістю та поглинанням вібрації, високою точністю та точністю. Важливі технічні характеристики цього токарного верстата з ЧПК: потужність головного шпинделя 33 кВт, максимальний крутний момент 630 Нм, максимальний діапазон обертів 3250 об/хв, максимальне зусилля

задньої бабки 1250 дН, максимальний діаметр точіння Ø 465 мм і максимальна довжина точіння 1050 мм.

Таблиця 1.12 – Механічні та фізичні властивості вуглецевої сталі AISI 1045

Властивості	**Значення**
Границя міцності на розтягання	585 МПа
Границя текучості	450 МПа
Модуль повздовжньої пружності	200 ГПа
Коефіцієнт Пуассона	0,29
Твердість за Бринелем	163
Густина	7,87 г/см^3

Встановлення та затискання заготовки виконувалося за допомогою трикулачкового патрона (головний шпиндель) і поворотного центру (задня бабка). Така комбінація пристосувань забезпечила достатню жорсткість і мінімальну податливість вузла пристосування-заготовка.

Варіювали сім параметрів, три чисельно-кінематичні фактори, тобто швидкість різання, подача, глибина різання, і чотири категоріально-геометричні фактори (радіус кута, нахил, нахил і кут підходу). Безперервні параметри варіювали на двох рівнях, а категоріальні – на трьох рівнях. Дизайн експерименту базувався на А-оптимальному плані, який дозволив нам мінімізувати кількість необхідних прогонів, маючи можливість ефективно та надійно ідентифікувати активну підмножину факторів. Окрім мінімізації середньої дисперсії оцінок параметрів, А-оптимальний дизайн значно зменшує найгіршу дисперсію прогнозу порівняно з D-оптимальним дизайном, як обговорювалося Джонсом та ін. [297]. Кожен із 27 унікальних експериментів із таблиці проектування проводився з використанням абсолютно нової ріжучої пластини з CVD-покриттям. Загальні характеристики ріжучих пластин, використаних у цьому експерименті: код форми пластини T, кількість ріжучих кромок 3, кут пластини 60°, кут зазору 7°, товщина пластини 4 мм, діаметр кріпильного отвору 4,5 мм, діаметр вписаного кола 9,53 мм , теоретична довжина

ріжучої кромки 16,5 мм, ефективна довжина різальної кромки 14,5 мм. Параметри обробки та ріжучі інструменти були обрані відповідно до рекомендацій виробника ріжучих пластин і базувалися на матеріалі заготовки, геометрії заготовки, характеристиках обладнання, стабільності тощо.

Вихідна змінна в цьому експерименті, середня арифметична шорсткість поверхні, була виміряна та записана для всіх 27 експериментів. Вимірювання шорсткості поверхні проводили на вимірювальному пристрої Talysurf з такими основними характеристиками: радіусна точність 0,006 %, шум шорсткості менше ніж 10 нм Rz і роздільна здатність датчика до 0,3 нм. Колона та основа вимірювального приладу виготовлені з композитного граніту для забезпечення високого гасіння вібрації, теплової інерції та жорсткості протягом усього циклу вимірювання. Крім того, вимірювальний прилад має пасивні повітряні кріплення у функції антивібраційної системи. Значення Ra оцінювали в межах довжини оцінки, яка складалася з п’яти довжин вибірки, тобто п’яти граничних довжин хвиль профільного фільтра. Для розділення характеристик шорсткості та хвилястості використовували фільтри Гауса. Вимірювання проводилося з довжиною відсікання 0,8 мм, довжиною зразка 0,8 мм і довжиною оцінки 4 мм. Вимірювання проводили вздовж контурних ліній заготовки в десяти радіальних напрямках, орієнтованих під кутом 36° відносно осі заготовки. Значення шорсткості поверхні розраховували як середні значення, отримані з десяти повторних вимірювань.

У табл. 1.16 наведено фактори в цьому плані експерименту з їхніми відповідними рівнями. У той час як безперервні фактори змінюються на їх високому та низькому рівнях, категоричні фактори змінюються на трьох рівнях, які відповідають реальним значенням параметрів у комерційно доступних пластинах для ріжучих інструментів.

Результати

На основі таблиці експерименту, створеної для А-оптимального дизайну з 27 прогонами, усі експерименти проводилися з використанням рівнів, визначених у табл. 1.13 . Результати вимірювань наведені в табл. 1.14.

Таблиця 1.13 – Вікно процесу

Параметри	Низький рівень	Середній рівень	Високий рівень
Швидкість різання, v_c (mm/min)	400	/	600
подача, f (mm/rev)	0,1	/	0,2
Глибина різання, a_p (mm)	1,5	/	2,5
Радіус округлення кута, r (mm)	0,4	0,8	1,2
Передній кут, γ (°)	3	6	9
Кут нахилу, α (°)	0	3	6
Кут нальоту, к (°)	60	75	90

Таблиця 1.14 – Результати вимірювань

Run	v_c (mm/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)	r (mm)	γ (°)	λ (°)	к (°)	Ra_1 (мкм)	Ra_2 (мкм)	Ra_3 (мкм)	Ra_4 (мкм)	Ra_5 (мкм)	Ra_6 (мкм)	Ra_7 (мкм)	Ra_8 (мкм)	Ra_9 (мкм)	Ra_{10} (мкм)
1	400	0,2	2,5	1,2	3	0	90	1,69	1,72	1,69	1,67	1,68	1,73	1,68	1,68	1,67	1,69
2	400	0,2	1,5	0,4	9	3	90	4,20	4,22	4,10	4,12	4,16	4,23	4,13	4,15	4,12	4,10
3	600	0,1	1,5	0,8	9	0	60	0,52	0,51	0,50	0,50	0,52	0,50	0,51	0,52	0,50	0,51
4	600	0,2	2,5	0,8	9	6	60	2,25	2,27	2,19	2,21	2,23	2,25	2,22	2,24	2,21	2,19
5	600	0,2	1,5	1,2	3	0	75	1,61	1,66	1,60	1,63	1,65	1,64	1,62	1,66	1,60	1,61
6	400	0,2	1,5	0,8	6	3	90	2,38	2,43	2,33	2,36	2,40	2,41	2,36	2,41	2,33	2,38
7	600	0,2	1,5	0,4	3	0	75	4,81	4,96	4,89	4,85	4,94	4,97	4,85	4,93	4,89	4,81
8	600	0,1	2,5	1,2	6	6	75	0,42	0,43	0,41	0,42	0,42	0,42	0,41	0,43	0,43	0,41
9	400	0,1	2,5	0,4	3	3	60	1,32	1,35	1,29	1,31	1,33	1,34	1,33	1,33	1,35	1,29
10	400	0,1	1,5	0,8	3	6	90	0,67	0,67	0,65	0,65	0,66	0,67	0,65	0,64	0,66	0,65
11	400	0,2	2,5	0,4	6	0	60	4,95	4,97	4,83	4,85	4,90	4,98	4,86	4,89	4,90	4,85
12	400	0,1	1,5	1,2	9	0	60	0,35	0,36	0,34	0,35	0,35	0,36	0,34	0,35	0,35	0,35
13	400	0,2	1,5	0,4	9	6	75	4,45	4,50	4,32	4,37	4,41	4,49	4,37	4,43	4,41	4,37
14	600	0,1	1,5	0,4	6	0	90	1,01	1,03	0,99	1,00	1,02	1,03	1,01	1,03	1,02	1,00
15	600	0,2	1,5	1,2	6	3	60	1,55	1,61	1,58	1,56	1,60	1,61	1,57	1,61	1,60	1,56
16	600	0,2	2,5	0,8	6	0	90	2,32	2,37	2,27	2,30	2,34	2,37	2,30	2,33	2,34	2,30
17	400	0,2	1,5	1,2	3	6	60	1,77	1,83	1,75	1,79	1,81	1,83	1,79	1,81	1,79	1,75
18	600	0,1	1,5	0,8	3	3	75	0,61	0,63	0,61	0,62	0,63	0,62	0,62	0,61	0,62	0,61
19	600	0,2	2,5	1,2	9	6	90	1,42	1,48	1,45	1,44	1,46	1,47	1,44	1,41	1,44	1,45
20	600	0,1	1,5	0,4	6	6	60	1,24	1,30	1,27	1,26	1,28	1,29	1,27	1,27	1,24	1,26
21	400	0,2	1,5	0,8	6	6	75	2,51	2,55	2,45	2,47	2,53	2,55	2,46	2,51	2,51	2,47
22	400	0,1	2,5	0,8	9	0	75	0,54	0,53	0,52	0,54	0,52	0,53	0,54	0,51	0,53	0,54
23	600	0,2	2,5	0,8	3	3	60	2,55	2,63	2,53	2,58	2,61	2,63	2,56	2,61	2,63	2,55
24	400	0,1	2,5	1,2	6	3	75	0,40	0,42	0,41	0,41	0,41	0,41	0,40	0,41	0,42	0,41
25	600	0,2	2,5	0,4	9	3	75	4,17	4,13	4,29	4,21	4,25	4,13	4,21	4,22	4,29	4,21
26	600	0,1	2,5	0,4	3	6	90	1,34	1,31	1,28	1,30	1,32	1,33	1,30	1,29	1,28	1,30
27	600	0,1	1,5	1,2	9	3	90	0,35	0,34	0,33	0,34	0,34	0,34	0,33	0,36	0,33	0,34

Статистичний аналіз проводився в SAS JMP 14. Регресійна модель була обрана відповідно до трьох параметрів: інформаційний критерій Акаіке (AIC),

інформаційний критерій Байєса (BIC) і коефіцієнт детермінації (R2). Щоб полегшити прийняття остаточної моделі регресії, було використано два загальні інформаційні критерії, AIC та BIC. Обидва критерії по суті карають за неадекватне підгонку, менші значення вказують на моделі з кращими можливостями прогнозування. Прийнята модель має 15 термінів і відповідає обом критеріям у тому, що вони досягають своїх мінімальних значень. Для більш складних моделей BIC продовжує зменшуватися, а AIC зростає. Прийнята модель регресії є лінійною та пояснює понад 99 відсотків мінливості процесу. Його середньоквадратична помилка (RMSE) мала порівняно із середнім значенням відповіді, що дає вузький довірчий інтервал. Підсумок відповідності та дисперсійний аналіз наведено в табл. 1.15 та 1.16 відповідно.

У табл. 1.17 наведено оцінені коефіцієнти регресії, відсортовані за зростанням p-значень. Очевидно, що найбільш впливовим фактором є подача, потім радіус кута та інші фактори. Серед взаємодій найбільш впливовим на якість поверхні є двостороння взаємодія між подачею та кутовим радіусом. Хоча глибина різу сама по собі не є статистично значущою, вона є частиною статистично значущої взаємодії з кутом нахилу.

Таблиця 1.15 – Підсумок відповідності

Елемент	**Значення**
R^2	0,999756
R^2_{adj}	0,999471
RMSE	0,03332
Середня відгуку	1,906222
Спостереження	27

Таблиця 1.16 – Дисперсійний аналіз

Джерело	**DF**	**Сума квадратів**	**Середній квадрат**	**F співвідношення**
Модель	14	54,542912	3,89592	3509,075
Похибка	12	0,013323	0,00111	Вирогідність > F
Загалом	26	54,556235		<.0001*

Як видно з табл. 1.20, швидкість різання та кут наближення не фігурують у прийнятій моделі.

Таблиця 1.17 – Оцінені коефіцієнти регресії (* статистична значущість)

Термін	**Очікування**	**Похибка за Стьюдентом**	**t відношення**	**Вирогідність>|t|**
Перехоплення	2,0335718	0,009382	216,75	<,0001*
f (0.1, 0.2)	1,1134142	0,00861	129,32	<,0001*
r {1.2&0.8-0.4} }	-0,839439	0,00999	-84,03	<,0001*
f x (r {1.2&0.8-0.4} - 0.33333)	-0,54846	0,009049	-60,61	<,0001*
r {1.2-0.8}	-0,224897	0,008628	-26,07	<,0001*
γ {3&6-9}	0,1447973	0,008194	17,67	<,0001*
f x r {1.2-0.8}	-0,16767	0,010016	-16,74	<,0001*
(r {1.2&0.8-0.4} - 0.33333) x (γ {3&6-9} - 0.33333)	-0,11126	0,01283	-8,67	<,0001*
γ {3-6}	0,0574647	0,009028	6,37	<,0001*
λ {6-3&0}	0,0540529	0,009508	5,68	0,0001*
f x (γ {3&6-9} - 0.33333)	0,0663919	0,013749	4,83	0,0004*
(γ {3&6-9} - 0.33333) x λ {3-0}	0,0426176	0,011096	3,84	0,0023*
ap x (λ {6-3&0} + 0.33333)	-0,029261	0,008876	-3,30	0,0064*
λ {3-0}	0,0291962	0,010412	2,80	0,0159*
a_p (1.5, 2.5)	0,0134771	0,007735	1,74	0,1070

Основні ефекти термінів, які кваліфікувалися для прийнятої регресійної моделі, показані на рис. 1.70. Діаграма профайлера показує налаштування факторів, які є результатом максимізації функції бажаності, яка, у випадку цього дослідження, мінімізує середню арифметичну поверхню шорсткість. Як показано на рис. 1.70, прийнята модель передбачає середнє значення Ra = 0,238 мкм.

Прийнята регресійна модель була перевірена експериментально через десять додаткових підтверджуючих експериментів. Експерименти для підтвердження були проведені з оптимізованими параметрами, показаними в профайлері прогнозу (рис. 1.70). Виміряні значення Ra згодом використовували для побудови експериментальних 95% довірчих інтервалів, які повинні містити прогнозоване середнє Ra.

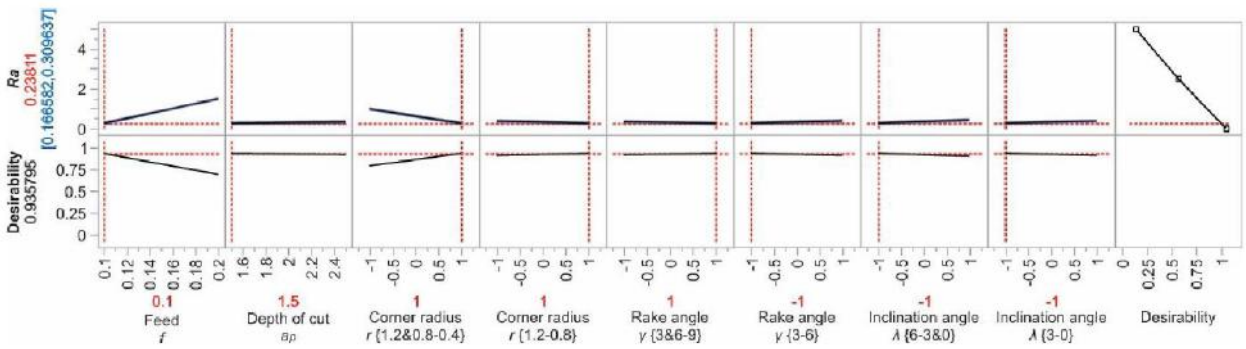


Рисунок 1.70 – Профайлер прогнозування

Незважаючи на те, що швидкість різання та кут наближення були виключені з прийнятої регресійної моделі, діаграми, показані на рис. 1.71, були використані для визначення їх рівнів з метою проведення підтверджуючих експериментів.

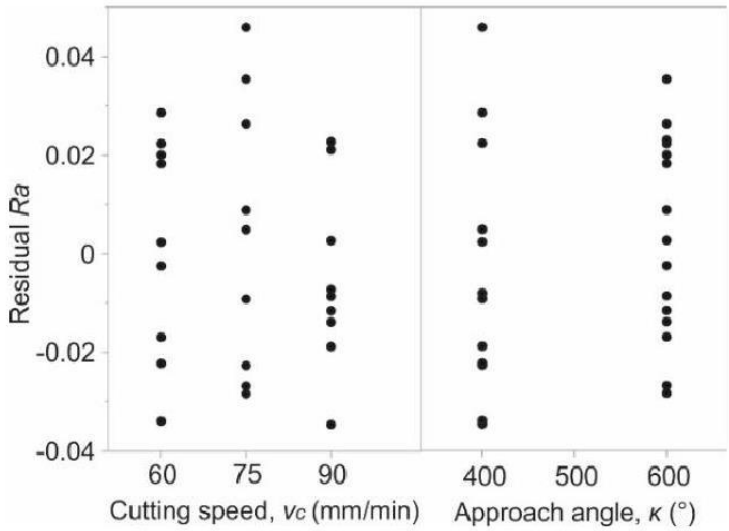


Рисунок 1.71 – Залишки шорсткості поверхні Ra від швидкості різання v_c (мм/хв) і кута наближення к (°)

Залишки Ra були побудовані в залежності від швидкості різання та кута наближення, і спостерігалися отримані дисперсії. Розглядаючи низький і високий рівні на обох графіках, можна зробити висновок, що збереження швидкості різання на високому рівні (600 мм/хв) сприяє зменшенню дисперсії, тобто дисперсія дорівнює 0,064, на відміну від 0,080 на низькому рівні (400 мм/хв). Подібним чином перевага надається куту наближення 90° через найменшу дисперсію порівняно з двома іншими рівнями.

З огляду на це, були проведені підтверджувальні експерименти з такими значеннями факторів: швидкість різання v_c = 600 мм/хв, подача f = 0,1 мм/об, глибина різання a_p = 1,5 мм, радіус кута r = 1,2 мм, передній кут γ = 6°, кут нахилу λ= 6° та кут наближення κ = 90°.

Кожна з десяти підтверджувальних експериментальних батарей складалася з десяти вимірювань. Вимірювання використовували для створення десяти 95% довірчих інтервалів. Інтервали показані на рис. 1.72, де червона опорна лінія позначає середнє Ra, передбачене регресійною моделлю. Як видно, лише один із експериментально побудованих ДІ не містить прогнозованого середнього значення. Крім того, 95% ДІ = [0,240, 0,248], побудований на основі загальних 100 вимірювань, хоча й дуже вузький, пропускає прогнозоване середнє значення Ra на 0,002 мкм.

Якість обробленої поверхні значною мірою залежить від значень і відносних величин кутового радіуса і подачі. При постійній подачі менші кутові радіуси давали гіршу якість поверхні.

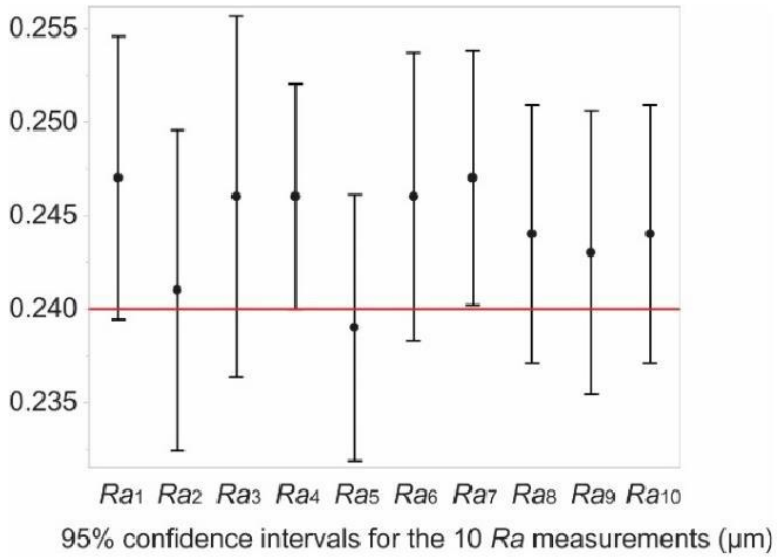


Рисунок 1.72 – Результати підтвердження

Це можна пояснити зміною переднього кута вздовж ріжучої кромки, а також нерівномірним розподілом тиску в зоні різання. Коли радіус кута збільшується, вироблене тепло розсіюється по більшій площі контакту між наконечником інструмента та матеріалом заготовки, таким чином знижуючи

теплове навантаження та знос інструменту. Більший радіус кута також може спричинити збільшення шуму та вібрації, що не було зафіксовано під час цього дослідження. Використання стружколомів сприяло утворенню зламаної стружки під час експерименту. Крім того, більші радіуси сприяють більш збалансованому розподілу виробленого тепла.

Шорсткість поверхні збільшується при більших подачах, тобто піки та западини, створені кінчиком інструмента на поверхні заготовки, стають все ширшими та глибшими. Теоретично, геометрична шорсткість поверхні є функцією подачі для даного радіуса кута, що пояснює кращу якість поверхні при менших подачах.

Збільшення переднього кута сприяє покращенню якості поверхні. Більший передній кут зменшує кут клина ріжучого інструменту, що призводить до більш гострого інструменту. Певним чином це сприяє зменшенню шорсткості поверхні. Однак із збільшенням переднього кута клин ріжучого інструменту слабшає, тобто втрачається стабільність ріжучої кромки, що призводить до незначного погіршення якості поверхні. Крім того, менші передні кути можуть сприяти кращому руйнуванню стружки через меншу когезію між сусідніми шарами під час утворення стружки.

Кут нахилу безпосередньо впливає на напрямок руху стружки під час різання. При нульовому куті нахилу стружка тече ортогонально до напрямку ріжучої кромки. У міру збільшення кута наближення стружка тече в напрямку, протилежному подачі, до заготовки. Під час цього експерименту спостерігалося незначне пошкодження обробленої поверхні через удар стружки.

Збільшення глибини різання сприяє зниженню терміну служби інструменту. Об'єм нерозбитої стружки збільшується, таким чином збільшуючи силу, яка сприяє деформації ріжучої кромки, тому менша глибина різання сприяє кращій якості поверхні.

Хоча попередні дослідження повідомляють про важливість швидкості різання для активації механізмів зносу інструменту, її зменшений вплив на шорсткість поверхні в цьому дослідженні вказує на те, що під час процесу різання не було досягнуто критичного зносу інструменту. Зі збільшенням

швидкості різання якість поверхні стає кращою завдяки меншій силі різання, що в кінцевому підсумку призводить до мінімізації вібрацій.

Кут наближення впливає на довжину ріжучої кромки, що контактує з деталлю, і впливає на розподіл сили різання, тобто сили навантаження на деталь. При менших кутах нахилу сила різання розподіляється на більшу частину ріжучої кромки, при однаковій подачі інструменту утворюється тонша стружка, а концентрований знос пластини інструменту зменшується. Зі збільшенням кута нахилу опір подачі зростає, а сила проникнення зменшується, таким чином зменшуючи ризик вібрації.

Нарешті, ріжучі пластини з позитивною основною геометрією, використані в цьому дослідженні, сприяли меншим зусиллям різання, водночас зменшуючи ризик вібрації. Менші сили різання викликають менше вібрації, що позитивно впливає на якість поверхні. Високі температури, які присутні в зоні обробки, можуть пом’якшити матеріал, у той час як стимульоване зсувування випереджає оранку. У поєднанні з меншими зусиллями різання більший зсув і нижча оранка позитивно впливають на стабільність інструменту, що також сприяє якості поверхні. Зменшуючи тертя, покриття CVD також зменшує тепло, що виділяється в зоні обробки. В результаті спостерігаються менші термічні навантаження на пластини ріжучого інструменту, що, у свою чергу, призводить до відсутності додаткових механізмів зношування інструменту, які є результатом високих температур, таких як термічні тріщини, нарощені кромки тощо. це сприяло збільшенню терміну служби інструменту та вищій якості поверхні після чистового точіння. Слід також зазначити, що стружколоми, використані в експерименті, підвищили ефективність руйнування стружки, що дозволило зламаній стружці бути домінуючою формою стружки в процесі.

Як згадувалося раніше, експерименти для підтвердження проводилися з теоретично оптимізованими налаштуваннями, які дозволили отримати мінімальну шорсткість поверхні. Середня відсоткова похибка підтверджувального експерименту дорівнює 2,58 %, а середня абсолютна похибка – 0,006 мкм. Невеликий відсоток і середня абсолютна похибки додатково підкреслюють потенціал практичного застосування запропонованої

моделі. Насправді абсолютна похибка на порядок величини 10-3 мкм практично не впливає на шорсткість поверхні. Крім того, ця похибка також практично виходить за межі точності традиційних вимірювальних приладів, які використовуються в експериментах з шорсткістю поверхні.

1.3 Інтелектуальна система автоматизованого вибору схем базування деталей і раціонального вибору матеріалу

1.3.1 Вибір матеріалів у розробці продукту: виклики та інструменти управління якістю

В основі матеріалознавства лежить відома парадигма (рис. 1.73) про зв’язок між структурою матеріалу, методами обробки для отримання цього матеріалу та результуючими властивостями матеріалу. Комплексне поєднання всіх цих аспектів забезпечує ефективність матеріалу в конкретному застосуванні [298].

Зрештою, матеріали впливають на функціонування продукту, задоволеність споживачів, виробничі системи, життєвий цикл продукту, хто його використовує або виробляє, зручність використання, ідентичність продукту, робоче середовище та вартість [299].

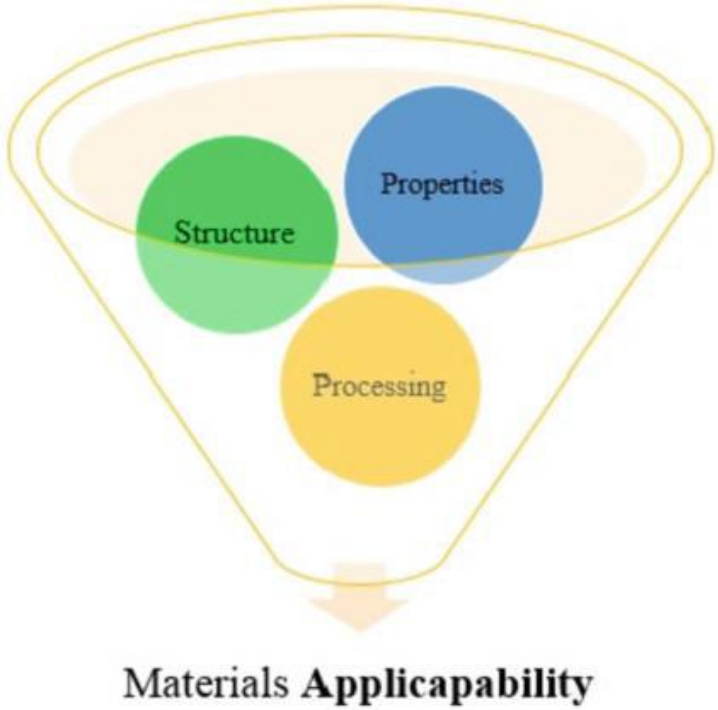


Рисунок 1.73 – Парадигма матеріалознавства

Вибір відповідного матеріалу або групи для розробки продукту часто є складним, відповідальним і комплексним завданням для інженерів. Вибір матеріалу є виснажливим завданням у виробництві, тому що перед прийняттям остаточного рішення необхідно ретельно оцінити багато факторів [300]. Основні вимоги можуть відрізнятися від програми до програми.

Тим не менш, залежно від робочого середовища може також знадобитися враховувати декілька інших взаємопов'язаних факторів, що робить процес вибору більш складним і трудомістким [301]. У минулому вибір матеріалу був лише невеликою частиною процесу проектування. Тому він не отримав такого ж рівня досліджень і розробок, як інші напрямки дизайну [302].

Тим не менш, було розроблено декілька методів для вирішення проблем вибору матеріалів, деякі з яких можуть бути застосовані до вибору матеріалу та будь-якої процедури вибору конструкції [302]. На сьогоднішній день не існує єдиного стандартного та універсального методу, але існують також широко використовувані методи, такі як комп'ютерні бази даних, індикатори ефективності, матриці рішень, експертні системи, аналіз витрат, аналіз відмов, аналіз витрат і вигод тощо [303].

Аналіз відмов – це логічне та систематичне оцінювання компонента шляхом аналітичного спостереження та перевірки належної інженерної практики. Залежно від дефекту дослідник може виконати аналіз пошкодження за допомогою макроскопічного та мікроскопічного дослідження, аналізу композитного матеріалу, оцінки супрамолекулярної структури та фізичних або механічних випробувань. Можуть проводитися як неруйнівні, так і руйнівні випробування. Хоча вибір експериментальних матеріалів, наприклад через тестування та прототипіювання, є найбільш точним для конкретного конструкторського рішення, через необхідний час і високу вартість експериментів, особливо якщо потрібно більше матеріалу, швидко стає неможливим [304].

Аналіз першопричини (Root cause analysis (RCA)) є одним із найпростіших способів вирішення проблеми в наборі інженерних інструментів. Застосовується

для виявлення першопричин відмов (дефектів, збоїв) в інженерних системах та їх усунення [305].

У цій роботі представлені теоретичні основи концепції чотирьох інструментів управління та практично показано, як їх можна і потрібно використовувати для візуалізації, оцінки та подальшого аналізу полімерних матеріалів під час експлуатації.

Проблема дослідження

1 Визначення критеріїв вибору матеріалів при розробці продукту

На практиці інженер-матеріалознавець повинен контролювати три фактори, які впливають на вартість виробу: конструкцію компонентів, матеріали та технологію виробництва (рис. 1.74) [306]. Ці фактори взаємопов'язані, оскільки створення елемента може вплинути на те, який матеріал використовується, а також на конструкцію компонента та матеріал, який використовується, щоб вплинути на вибір технології виробництва.

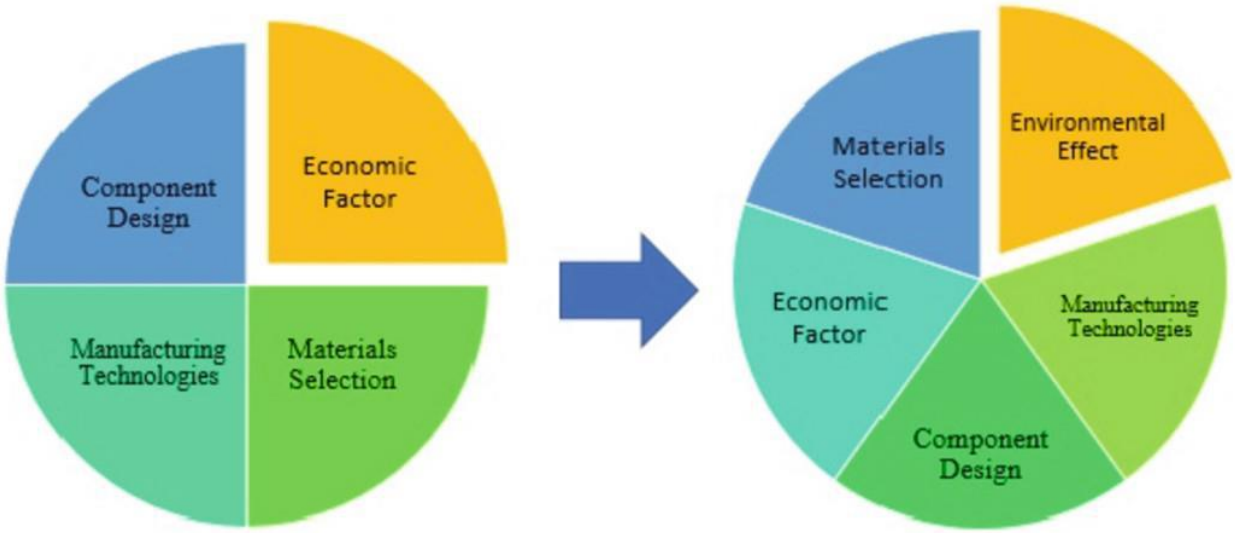


Рисунок 1.74 – Основні фактори сталого виробництва

Частина вартості компонента продукту пов'язана з його конструкцією (характеристика розмірів, форми та конфігурації, що впливає на продуктивність частин). Тому концепція конструкції повинна враховувати внесок кожного компонента в ефективну роботу всієї системи. Вибір матеріалів з відповідним поєднанням властивостей здійснюється за принципом доступності (найменшої

вартості). Тому проводиться порівняння вартості різних конкурентоспроможних матеріалів на основі ціни кожної деталі. На вибір виробничого процесу впливатиме як обраний матеріал, так і конструкція деталі [307].

Матеріали відіграють вирішальну роль у схемі «технологія – економіка – навколишнє середовище».

Отже, кінцевий продукт має бути розроблений таким чином, щоб мати мінімальний вплив на навколишнє середовище. Крім того, після закінчення терміну служби повинна бути можливість переробити матеріали компонентів або принаймні утилізувати їх з мінімальним впливом на навколишнє середовище [308].

2 Основні методи RCA для розробки продуктів або послуг

Аналіз першопричини використовується в ощадливому виробництві та допомагає виявити основні причини проблеми [309]. Основна мета цього методу полягає в тому, щоб знайти першопричину проблеми через низку запитань: що сталося, як це сталося і чому це сталося.

Цей системний підхід до вирішення проблем є першопричиною. Це допоможе розробити шляхи вирішення проблеми, щоб запобігти її повторенню. Загальна методологія RCA представлена на рис. 1.75.

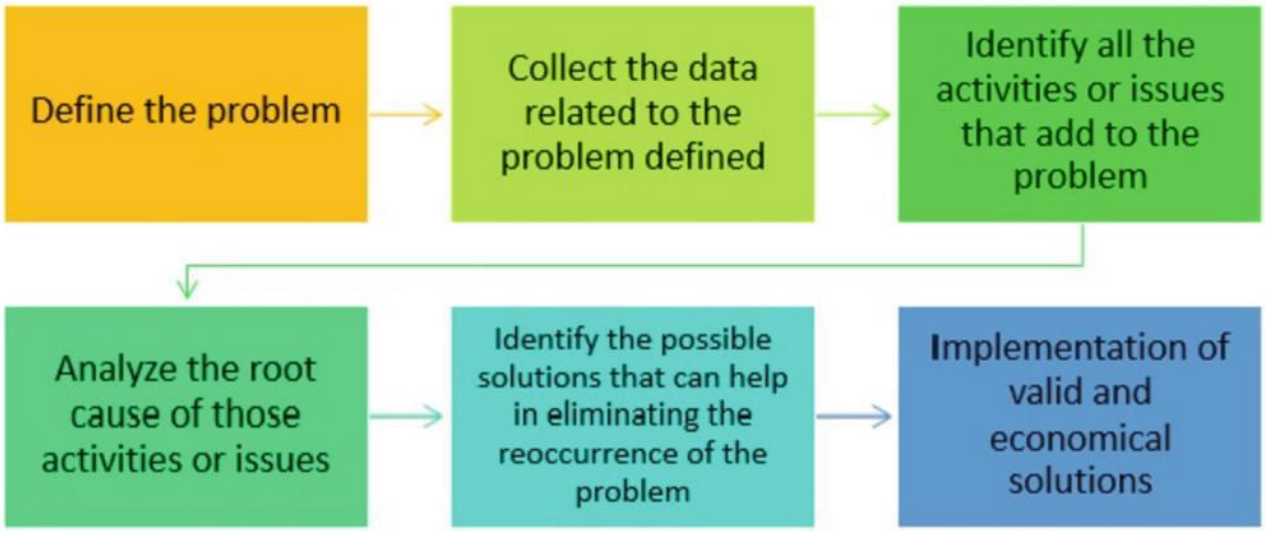


Рисунок 1.75 – Узагальнена методологія RCA

RCA включає досить відомі та популярні методи візуалізації, збору статистики та аналізу якості, такі як 5 чому, діаграма Fishbone, метод FMEA, метод Парето тощо [310].

Для нашого дослідження ми зупинилися на чотирьох найбільш застосовуваних у практиці матеріалознавства інструментах RCA: побудувати діаграму Fishbone та аналізувати дефекти полімерного композиту за FMEA, скласти будинок якості полімерних матеріалів та вивчити методику LCA.

Результати

1 Застосування причинно-наслідкового аналізу для дослідження дефектів полімерного композитного матеріалу

Аналіз причинно-наслідкових зв’язків допомагає визначити основні чинники, які роблять найбільш значний внесок у проблему, що розглядається, і запобігти або усунути їх дію. Цей метод вже знайшов своє практичне застосування в діагностиці і дефектоскопії матеріалів, зокрема для виявлення основних причин виходу з ладу кронштейнів автомобілів [311], для оцінки безпеки сферичних газових балонів в хімічній промисловості [312], технології виробництва біодизеля [313], в автомобілебудуванні [314] тощо.

Наступні кроки ілюструють методологію аналізу причин і наслідків:

Отже, згідно з основними етапами на рис. 1.76, було проаналізовано матеріалознавчу проблему отриманих полімеркомпозитних заготовок із низькими фізико-механічними властивостями.

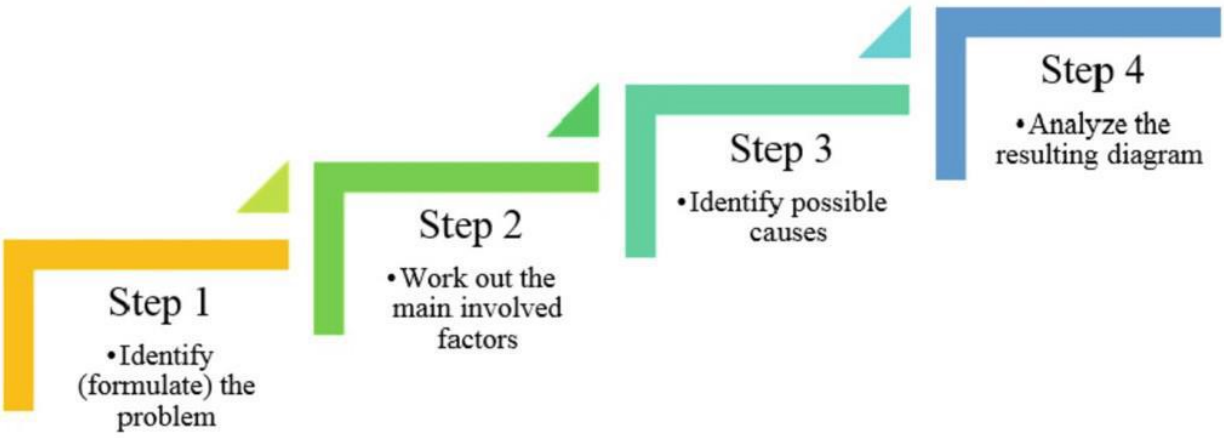


Рисунок 1.76 – Чотири основні кроки для застосування інструменту аналізу причин і наслідків

Ці заготовки призначені для виготовлення механічною обробкою різноманітних антифрикційних виробів, у тому числі підшипників ковзання, ущільнювальних кілець рухомих підшипників та інших вузлів тертя, що працюють у повітряних і рідких середовищах, вологих і сухих газах у вакуумі в діапазоні температур від мінус 120 °С до 260 °С. Заготовки отримані з полімерного композиту, який не відповідає стандартним показникам (занижені властивості). Матеріалом цих заготовок був Flubon 20 (80% полімерна матриця PTFE та 20% вуглецевих волокон) [315]. Було побудовано діаграму Fishbone (рис. 1.77).

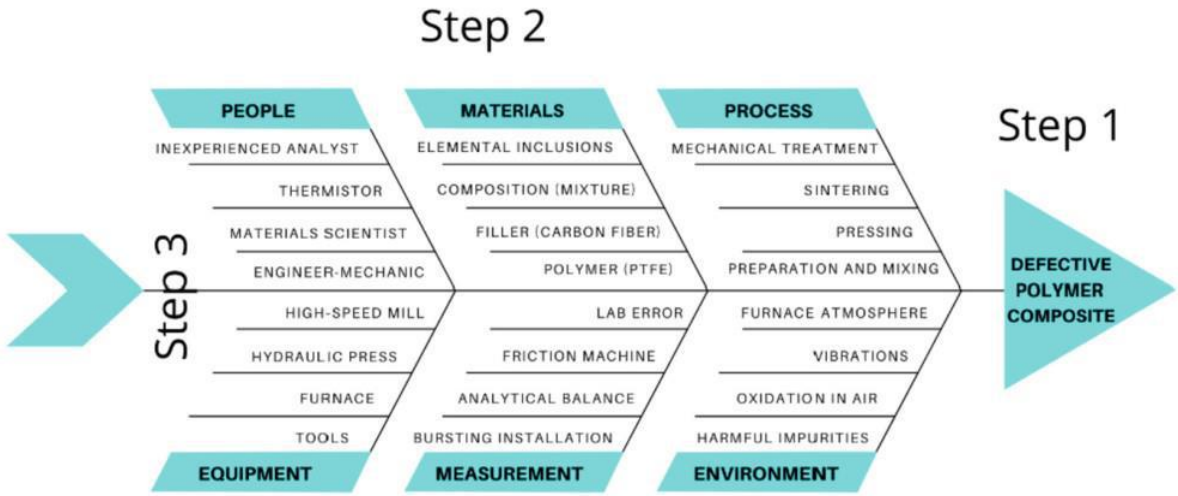


Рисунок 1.77 – Діаграма Fishbone аналізу дефектів полімерного композитного матеріалу

Візуальний аналіз оброблених точених поверхонь досліджуваних зразків виявив такі поверхневі дефекти матеріалу: нерівномірний розподіл вуглецевого волокна в полімерній матриці, плямисту структуру (чергування чорних і білих плям) та наявність тріщин. Під час випробувань на зношування відмічено підвищення температури в зоні тертя до 200 °С. Це призвело до злипання зразка з лічильником. Це явище пов’язане з низькими фізико-механічними властивостями матеріалу (низька щільність, нерівномірний розподіл наповнювача в полімері), що підтверджено проведеними випробуваннями. Усі зразки мають низьке подовження при розриві (30–100 %). Як правило, це є

наслідком неякісного змішування вихідних компонентів – наявність в матриці композиту підповерхневого або коагульованого волокна.

Причини були розділені на шість ключових позицій: людина, метод, матеріал, механізми, контроль і середовище. Найбільш суттєвими причинами цієї проблеми були виявлені низька кваліфікація працівника та порушення режиму технології змішування.

У зв'язку з високою відповідальністю подібних виробів з цього матеріалу в промисловості необхідно було б перевірити фізико-механічні властивості всієї партії. Ця проблема призведе до втрати матеріальних, фінансових ресурсів та часу або заміни всієї партії.

2 Дослідження та оцінка макроскопічних дефектів полімерного композиту за допомогою FMEA

На сьогодні щонайменше 80% обробки матеріалів і технологій здійснюється за допомогою аналізу типів і наслідків потенційної несумісності (методологія FMEA) [316]. Керівництво глобальних компаній широко впроваджує аналіз типів та наслідків потенційної несумісності для розробки нових конструкцій і технологій, аналізу та планування виробничих процесів і продукції [317]. Ця методологія дає змогу оцінити ризики та потенційні збитки від потенційних або існуючих дефектів від початкової стадії проектування до створення готового продукту або його компонентів [318].

Крім того, сфера застосування методу охоплює всі етапи життєвого циклу матеріалу, усі технологічні процеси та торгівлю [319]. Методологія проведення FMEA будь-якого продукту/дизайну передбачає виконання таких кроків (рис. 1.78).

Наприклад, FMEA використовувався для оцінки макроскопічних дефектів полімерних композиційних матеріалів. Зовнішніми дефектами є різні поверхневі тріщини, подряпини, відколи, відшарування та ін.

На макроскопічному рівні визначено такі характеристики полімерних композитів: рівномірний розподіл компонентів; кількість компонентів матеріалу, візуально різних за своєю структурою; геометричне розташування армувального наповнювача; геометрична форма компонентів матеріалу.

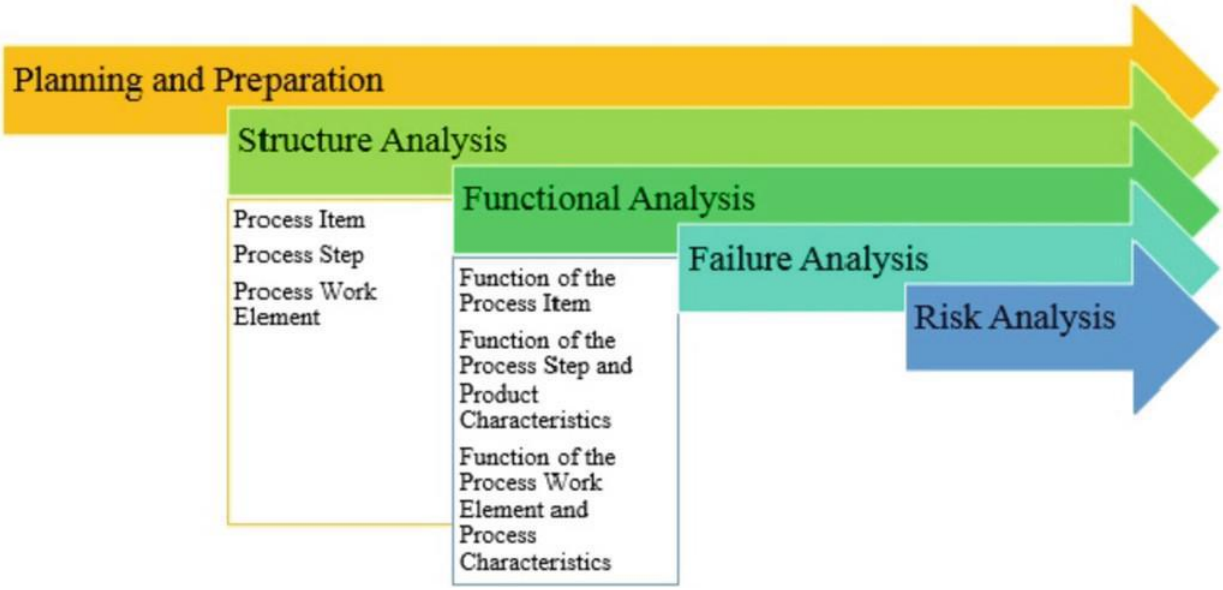


Рисунок 1.78 – Загальна методологія FMEA

Нарешті, згідно з методикою FMEA, описаною в [320], було оцінено типові поверхневі дефекти полімерних композитів та встановлено допустимі значення їх характеристик. Результати аналізу представлені в табл. 1.18.

Таблиця 1.18 – Матриця FMEA

Аналізований дефект	**Потенційні причини**	**Можливі наслідки**	**S·O·D* Оцінка ризику**	**Виявлення проблеми**
Поверхнева тріщина	Неправильний режим формування заготовки, висока швидкість охолодження. Ударні ефекти під час роботи	Пошкодження елементів верхньої, внутрішньої, наскрізної частини деталі	9·3·3 = 81 дефект не є критичним (менше ніж 100–120)	Визначається візуально, залежить від розміру дефектної частини, уражених шарів і напрямку тріщин
Подряпина	Необережність під час зняття деталей з оснастки та обробки	Зміна складу матеріалу в поперечному перерізі дефекту та фізико-механічних властивостей	5·1·3 = 15 не є велико-масштабними	Визначається візуально глибина і ширина дефекту, орієнтація дефекту на деталі
Включення	Отримання сторонніх матеріалів при		5·4·4 = 80 дефекти не є критичними	Розміри і товщина включення.

Аналізований дефект	Потенційні причини	Можливі наслідки	S·O·D* Оцінка ризику	Виявлення проблеми
	виготовленні препрегу			Глибина залягання
Сколи, порізи та дірки	Недбалість при знятті деталей з обладнання, транспортуванні, зберіганні, механічній обробці	Вони є концентра-торами напружень і знижують міцність композитів	4·2·2 = 16 не є велико-масштабними	Розміри дефекту, ширина, глибина
Локальні ділянки з високим вмістом волокон, матриці або пор	Недотримання режиму формування, часу і величини перепаду та швидкості нагріву	Ступінь небезпеки цих дефектів в кінцевому підсумку залежить від розміру, форми та локалізації дефекту	9·4·3 = 91 дефекти не є критичними	Визначається візуально, залежно від розміру дефектної частини, уражених шарів

* **Примітка.** S (серйозність) – оцінка найбільш серйозних наслідків потенційної відмови для споживачів; O (виникнення) – ймовірність конкретних причин і механізмів відмови; D (виявлення) – оцінка здатності пропонованих управлінських дій виявити цей тип відмови.

Хоча поверхневі дефекти незначно впливають на механічні властивості матеріалів у початковий період їх виникнення, але їх необхідно усунути, оскільки порушення суцільності зовнішньої поверхні матеріалу може додатково сприяти проникненню агресивних середовищ вглибину, що, в кінцевому підсумку, значно скоротить термін служби виробу.

Таким чином, цю методологію можна успішно застосовувати до всіх типів матеріалів. Це робить FMEA універсальним інструментом управління для оцінки якості матеріалів.

3 Метод QFD

QFD – це гнучкий метод прийняття рішень, який допомагає розробникам зосередитися на критичних характеристиках нового чи існуючого продукту чи послуги з точки зору окремого клієнта, сегмента ринку, компанії чи технології розробки [321]. Результатами методології є чіткі діаграми та матриці, які можна повторно використовувати для майбутніх товарів чи послуг [322, 323].

У загальному вигляді QFD складається з чотирьох матриць, необхідних для зв'язку функцій компанії та потреб клієнтів. Це планування продукції, розміщення деталей, планування процесу та планування виробництва (рис. 1.79). Початковий процес побудови QFD починається з матриці, яка пов’язує потреби клієнта з технічними вимогами та конкурентною інформацією. Цей процес супроводжується послідовністю матриць, які об’єднують технічні вимоги в систему проектування, функціонування та виробництва [324].

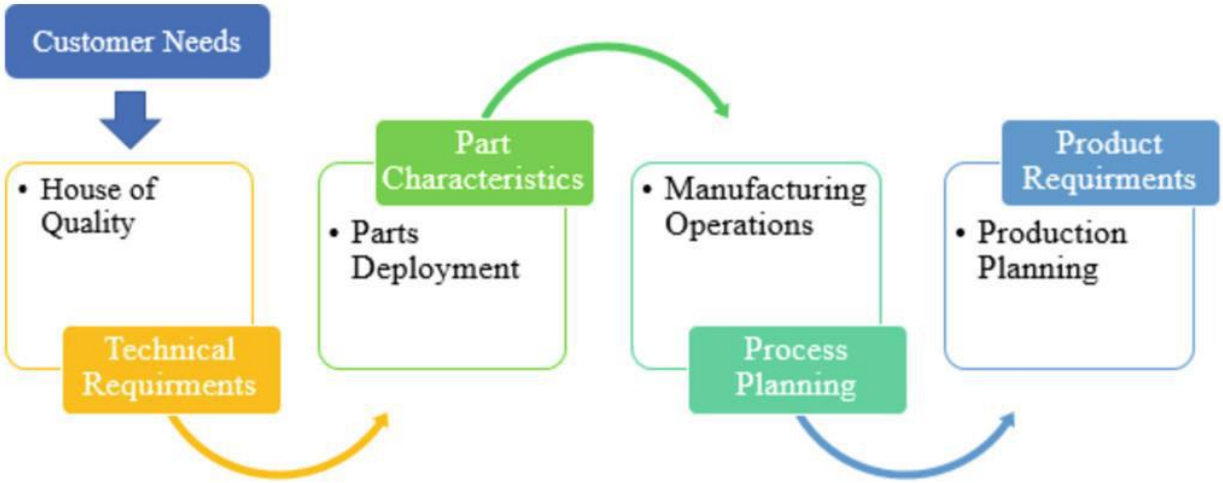


Рисунок 1.79 – Чотири матриці QFD

Функція якості QFD розгортається за допомогою діаграми у формі будиночка, на якій ці матриці підходять одна до одної (рис. 1.73). За своєю формою він отримав назву «Дім якості» (HOQ). Матриця HOQ є основою, яка керує всім процесом QFD і надає інструменти для інтеграції вимог клієнтів із технічними вимогами. Шість будівельних блоків матриці HOQ описані нижче (рис. 1.80).

Центральна частина будиночка (3) – табл., колонки якої відповідають технічним характеристикам (2), а лінії – вимогам споживача (1). У камерах зазначається рівень звикання, якщо він є. Дах будинку (5) являє собою інформацію про співвідношення між технічними характеристиками. Ліва кімната (1) містить колонку важливості вимог клієнта. Права кімната (4) складається з оцінки задоволення потреб (з точки зору споживача) в аналогічних продуктах на ринку. Підвал будинку (6) містить результати аналізу технічних

характеристик конкуруючих товарів, цільові значення технічних аспектів продукції, оцінки абсолютної та відносної важливості характеристик.

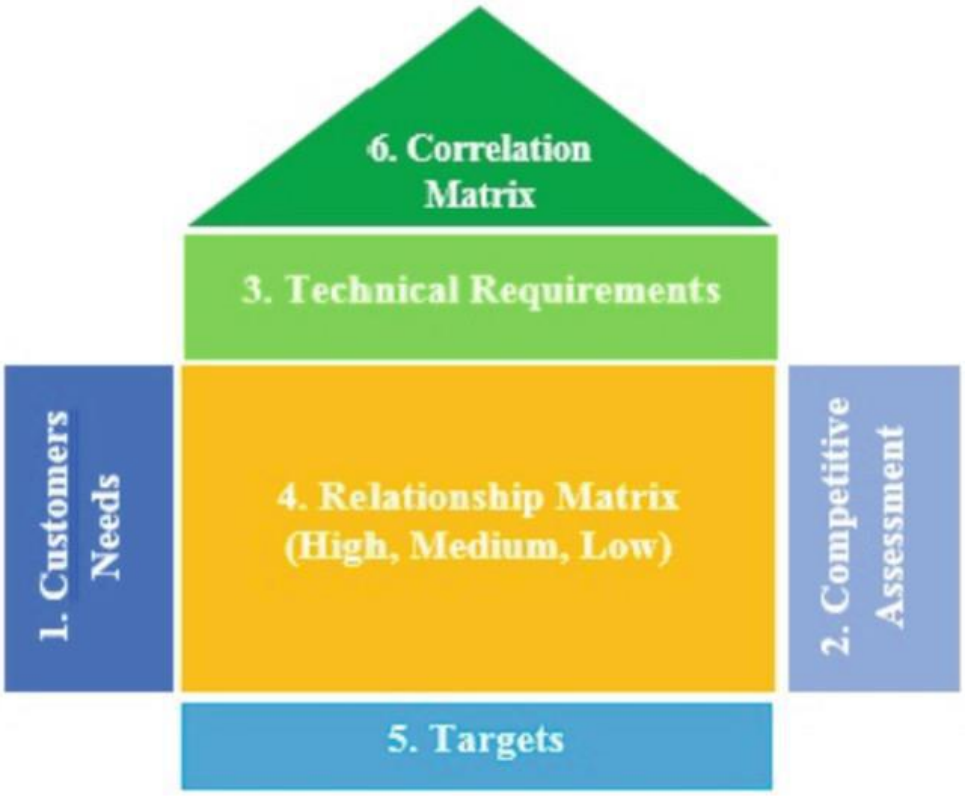
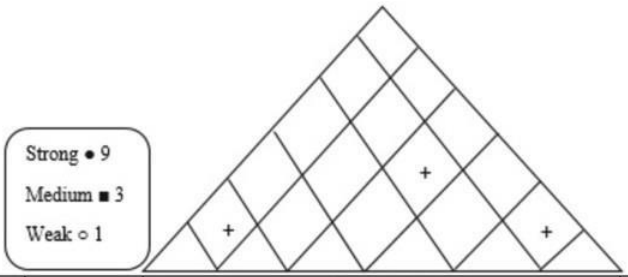


Рисунок 1.80 – Будинок матриці якості

За цією методикою проведено аналіз якості розроблених полімерних композитів на основі політетрафторетилену з різними наповнювачами [325]. Для найважливіших показників виробів з полімерного композиційного матеріалу наведено рис. 1.81, де показані зв’язки між вимогами та характеристиками. Інтенсивність взаємовідносин визначається експертним методом.

Властивості виробів з полімерних матеріалів значною мірою визначаються властивостями матриці, складом суміші і режимами технологічних процесів. Спочатку впорядкували параметри технологічного режиму за значущістю (від 1 до 5) (рис. 1.81, колонка 3). Потім було встановлено зв’язок між параметром технологічного режиму та характеристикою (присвоєно ваги сильним, середнім або слабким ланкам, відповідно, 9, 3, 1). Трансформація вимог замовника через QFD дозволяє визначити зв’язок між вимогами та характеристиками. Для визначення переваг розроблених матеріалів порівняно з промисловим аналогом

було проведено порівняння ступеня задоволеності споживачів (від 1 до 5). На основі аналізу QFD встановлено, що основними параметрами, що характеризують необхідні властивості досліджуваних виробів, є міцність на розрив, інтенсивність зношування та довговічність. Найбільш істотними факторами, що впливають на ці параметри, є матеріал полімеру і наповнювача і технологія їх змішування. Вплив цих параметрів слід досліджувати для встановлення кількісних залежностей. Визначено найбільш пріоритетні технічні характеристики для подальших досліджень і розробки рекомендацій щодо підвищення якості.



Row number	Requirement	Importance (1 to 5)	Characteristic						Competitiveness assessment					
			Strength at break	Relative elongation at break	Density	Intensity of wear	Coefficient of friction	Durability	Developed PTFE-composites [28]	Industry composite Flubon 20 [23]	Target value	Degree of improvement	Ponderability	Ponderability %
1	Type of polymer (matrix)	5	●	●	●	●	●	●	4	4	5	1,2	6,0	23,9
2	Type of filler	5	●	■	○	■	■	■	4	3	5	1,2	6,0	23,9
3	Mass ratio of polymer and filler	4	■	■	○	■	○	●	4	4	4	1,0	4,0	15,9
4	Mode of mechanical activation	3	●	●	○	●	○	■	3	0	4	1,3	3,9	15,5
5	The mixing time of the polymer with the filler	4	■	○	○	■	○	■	3	1	4	1,3	5,2	20,7
Absolute value			586,4	494,7	291,1	536,1	338,9	538,5						
Relative value, %			21	17,7	10,4	19,2	12,1	19,3						
Unit of measurement			MPa	%	kg/m^3	mm^3/N·m	–	h.						

Рисунок 1.81 – Будинок якісної матриці для полімерних композитів

4 Аналіз LCA

Багато промислових матеріалів, які ми споживаємо, походять із невідновлюваних джерел. До них належать більшість полімерів, які використовуються як сировина для використання, нафта та деякі метали. Ці цінні ресурси поступово виснажуються, що вимагає нових рішень: збільшення ресурсів, переробка нових матеріалів, порівнянних за обсягом з навколишнім середовищем, збільшення результатів або розробка нових технологій обробки. З

точки зору економіки виробництва, впливу навколишнього середовища та факторів навколишнього середовища на стале виробництво, життєвий цикл матеріалу «від колиски до могили» важливіший за весь процес виробництва [310].

Оцінка життєвого циклу (Life cycle assessment (LCA) включає оцінку потенційних аспектів навколишнього середовища та можливих аспектів, пов'язаних з матеріалом (або продуктом). Це систематичний набір процедур для збору та вивчення імпорту та експорту матеріалів та енергії та їх прямого впливу на навколишнє середовище (ISO 14040:2006 «Управління навколишнім середовищем. Оцінка життєвого циклу. Принципи та структура») (рис. 1.82)).

Оцінка життєвого циклу продукції базується на досить складній та комплексній методології оцінки впливу продукції на навколишнє середовище на всіх етапах її життєвого циклу: видобуток сировини, виробництво, використання, ремонт, обслуговування, транспортування продукту на всіх етапах, і закінчуючи утилізацією або переробкою відходів.

Основні кроки аналізу LCA підсумовано на рис. 1.83.

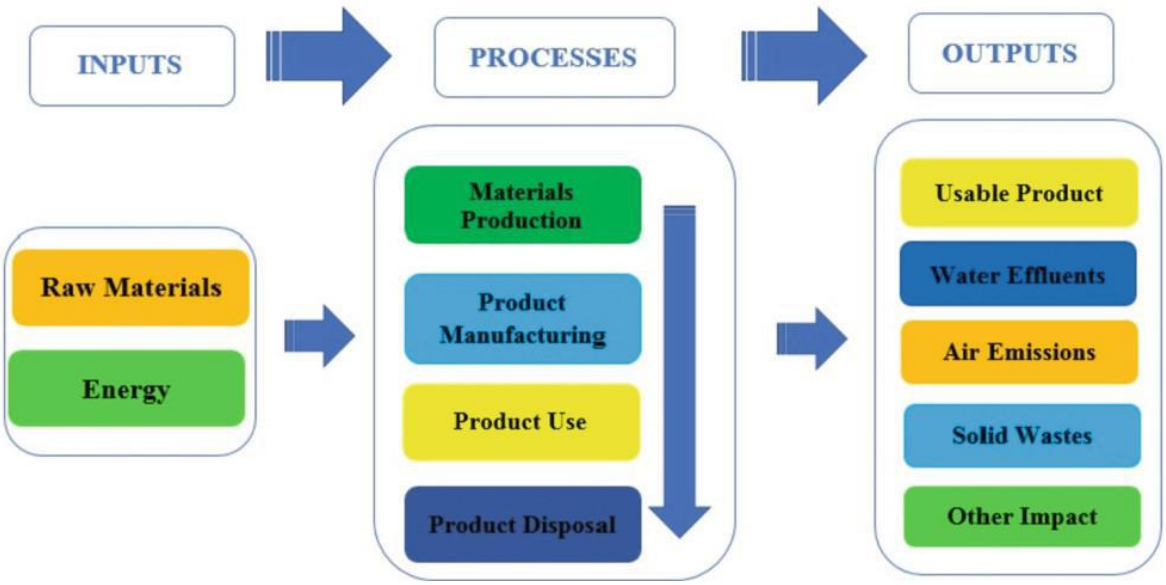


Рисунок 1.82 – Схема оцінки життєвого циклу виробу

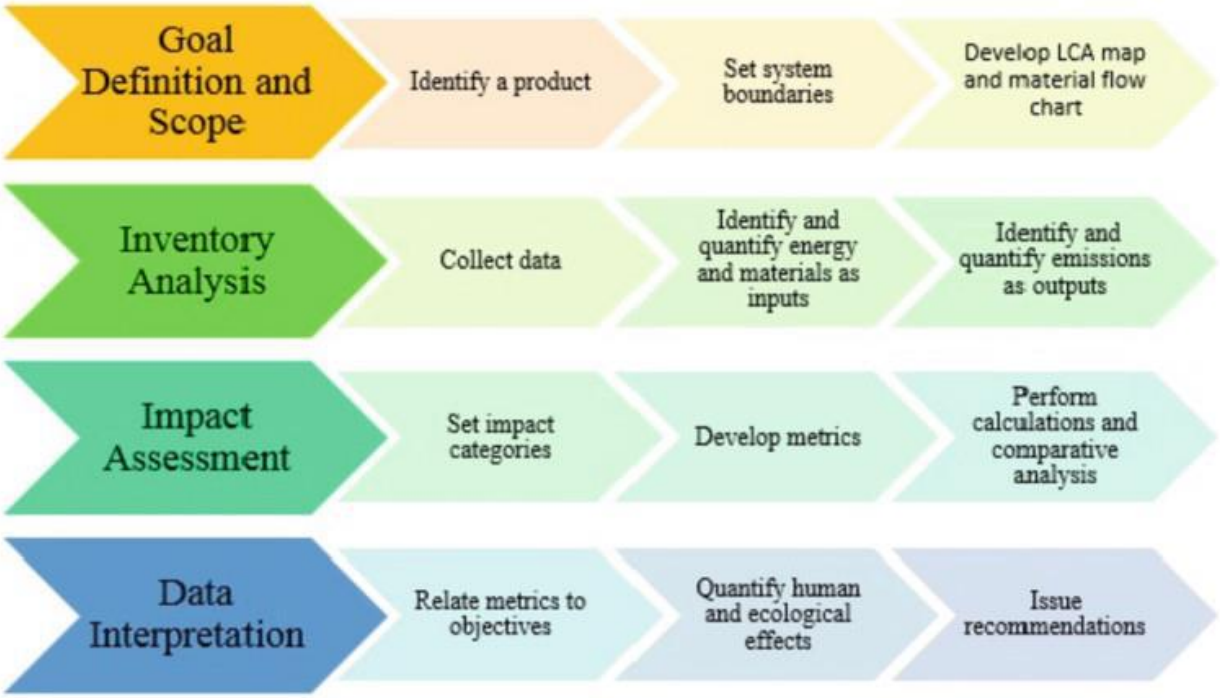


Рисунок 1.83 – Основні ключові кроки формального дослідження LCA

Чудовий приклад LCA був використаний для порівняння автомобіля як прикладу індивідуального транспортного засобу та автобуса як прикладу громадського транспорту [326, 327]. Матеріальний потік складається з наслідків у виробництві, використання та поводження з відповідними відходами. Були зібрані дані про всі матеріальні потоки, які генеруються автомобілем і автобусом під час їх експлуатації. Виявилося, що напруженість матеріалу автобуса значно вище, ніж у автомобіля, у 37 разів. Однак, враховуючи, що автобус подорожує в 7,4 рази довше, ніж автомобіль, і перевозить у 25 разів більше пасажирів, ніж легковий автомобіль, вплив громадського автобуса на кілометр і на одного пасажира порівняно з легковим автомобілем приблизно в 5,0 разів менший.

На основі порівняльного огляду впливу на навколишнє середовище різних видів традиційних біопластиків [328] зазначимо, що екологічними аспектами виробництва пластмас є негативний вплив на атмосферу та охорона атмосферного повітря, а також утворення невеликої кількості відходів у виробництво пластикової тари. Отже, оцінка повного життєвого циклу розроблених полімерних композитів на основі політетрафторетилену з різними типами наповнювачів [328] видається важливим і актуальним завданням для подальшого напряму досліджень.

Причинно-наслідковий аналіз наочно відображає взаємозв'язок досліджуваної проблеми і причин, що впливають на цю проблему; дає змогу провести змістовне дослідження ланцюга взаємопов’язаних причин, що впливають на проблему; зручний і простий у використанні та розумінні.

До недоліків цього якісного інструменту можна віднести складність правильного визначення зв'язку між досліджуваними проблемами. Причини досліджуваної проблеми комплексні, тобто є частиною більш складної проблеми. Обсяг аналізу досить широкий, але його часто застосовують щодо розроблених продуктів і пов’язаних з ними виробничих процесів.

FMEA визначає властивості матеріалу, які необхідно перевіряти, спостерігати та контролювати, щоб гарантувати надійність частин для матеріалу, який використовується для її виготовлення. Важливо розуміти, що цей вид аналізу спрямований на виявлення не реальних причин ймовірних відмов, а їх проявів, тобто типів і форм відмов (режимів відмов).

Основна перевага методології QFD над іншими підходами полягає в тому, що її можна застосовувати для обробки якісних і кількісних даних і служити гнучкою основою, яку можна спростити, розширити та поєднати з іншими методами проектування та покращення якості. Оскільки цей метод забезпечує як оцінку, так і рейтинг для кожного матеріалу, він допомагає конструкторам краще зрозуміти проблеми вибору матеріалу, враховуючи як відмінності та подібності альтернативних матеріалів. Таким чином, його можна застосувати до будь-якої складної проблеми прийняття рішення з багатьма альтернативами та кількісними критеріями.

LCA пластмас та інших конструкційних матеріалів відіграє важливу роль у підтримці енергії, економії ресурсів і грошей, запобігаючи передчасним поломкам інженерних компонентів машини чи обладнання. Дані LCA щодо матеріалів для обробки поверхонь покращують життєвий цикл компонента конструкції, підвищуючи енергоефективність, стійкість і запобігаючи глобальному зростанню температури.

Але LCA застосовний лише як його дані. Тому дані, які використовуються для завершення аналізу життєвого циклу, мають бути точними та актуальними.

Під час порівняння різних аналізів життєвого циклу еквівалентні дані повинні бути доступні для відповідного продукту або процесу. Якщо один продукт має набагато більшу доступність даних, це може бути несправедливо порівняно з іншим продуктом із менш детальними даними. Важливість даних є постійною проблемою для аналізу життєвого циклу. Завдяки глобалізації та швидким темпам досліджень і розробок на ринок постійно з'являються нові матеріали та методи виробництва. Це робить використання актуальної інформації дуже важливим і дуже складним під час виконання LCA. Якщо результати LCA правильні, дані мають бути актуальними; однак процес збору даних вимагає часу. Якщо продукт і пов'язані з ним процеси не зазнали істотних змін з моменту останнього збору даних LCA, надійність даних не є проблемою.

1.3.2 Експериментальна SMART виробнича система в SmartTechLab

Монтажне робоче місце під назвою SmartTechLab (рис. 1.84) – це лабораторія, яка використовується для навчання та досліджень у сфері цифровізації, автоматизації та впровадження роботів у виробництво за концепцією Industry 4.0 [329, 330, 331, 332]. SmartTechLab розташована на факультеті виробничих технологій Технічного університету Кошице в Пряшові, Словаччина. Лабораторія створена з метою вдосконалення науково-дослідницької діяльності співробітників університету та практичних знань його студентів у процесі навчання.

Студенти факультету отримують знання в галузі автоматизації, що підвищує їхні практичні навички.

Сьогодні в лабораторії відбуваються кілька видів досліджень і проектів, які збагачують діяльність факультету. Ця діяльність передбачає розвиток факультету та вдосконалення навчального процесу переважно на кафедрі промислової інженерії та інформатики.

Рисунок 1.84 – Фото SmartTechLab

У наступних частинах статті описано SmartTechLab, її складові частини, принципи роботи, а також пристрої та технології, які підтримують концепцію Industry 4.0.

Подібними питаннями (SMART Lab) займається лабораторія в Кельцькому технологічному університеті – Польща, або, наприклад, Лабораторія промисловості 4.0 – Smart Mini Factory з Вільного університету Бозен-Больцано – Італія, або Технологічний університет Грацу – Австрія. Автори робіт [332, 334, 335] досліджують концепцію Industry 4.0 та SMART виробництво, яка становить значний виклик для виробничого сектору та сфери послуг. У цих документах визначається та обговорюється система розумного виробництва, зазначається поточний стан впровадження та аналізується розрив між поточною системою виробництва та прогнозованою системою розумного виробництва в майбутньому. Представлено проблеми впровадження, можливості та майбутні напрямки для інтелектуальної виробничої системи. Оглядаються ключові технології та їх можливі застосування в системах інтелектуального виробництва Industry 4.0. У роботах [333, 333, 334, 335, 336] автори мають справу зі складанням. Основним завданням була ідентифікація та контроль деталей із синхронізацією всіх даних у цифрову модель близнюка. Ця область відкрита для

нових досліджень, розробки методології та визначення основних вимог, оскільки реальне застосування у виробничих процесах наразі все ще обмежене. На основі отриманих знань із дослідження діагностики помилок на поверхні компонентів за допомогою систем зорового розпізнавання з використанням алгоритмів машинного навчання вони почали використовувати згортувальну нейронну мережу (CNN) для розпізнавання стандартизованих промислових деталей. У роботах [337, 338] створено платформу візуального виявлення, а кілька вироблених продуктів узгоджено з даними хмарного сховища за допомогою експериментів, і запропоновано новий підхід до повністю автоматизованого створення цих даних на основі віртуальної 3D-моделі стандартизованих частин. У роботах [339, 340] запропоновано методологію моніторингу процесу FDM та співвіднесення теоретичної 3D моделі з виготовленою. Побудовано реконструйовану та теоретичну хмари точок досліджуваного зразка та проведено їх співвідношення. Числове оцінювання відсутнє.

Складальна система

Складальна лінія (рис. 1.85) складається з конвеєрних стрічок, які знаходяться в замкнутому циклі.

Перенесення об'єктів з однієї стрічки на іншу забезпечується автоматичними пневматичними поршнями, які висуваються після дотику до об'єкта на основі інформації від індуктивного датчика за допомогою пневматичної системи управління.

У лабораторії використовуються три роботи (рис. 1.86) – колаборативний робот ABB Yumi (рис. 1.86 – ліворуч) для допоміжного складання за підтримки змішаної реальності, Scara Mitsubishi (рис. 1.86 – посередині), який переносить об'єкти між поворотним столом і конвеєрною стрічкою.

Третій робот у вхідному сховищі – DOBOT Magician (рис. 1.86 – справа). Добот управляє вхідним і вихідним простором з компонентами та переміщує їх на конвеєр. Ці роботи працюють швидко, точно та ефективно і можуть таким чином замінити монтажників у виробничому процесі.

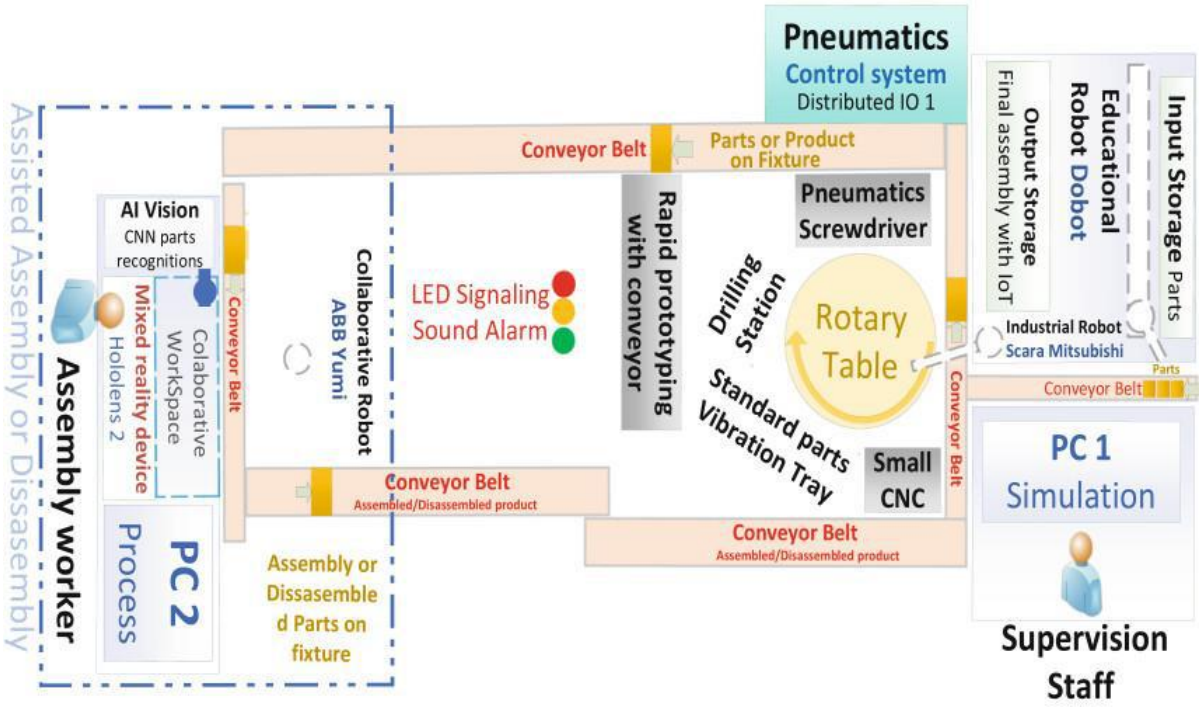


Рисунок 1.85 – Схема складальної системи

Рисунок 1.86 – Роботи для автоматизованого складання

Система керування S7-1500 на базі PLC (рис. 1.87) використовується для керування та синхронізації даних з усіх інтегрованих промислових технологій (системи зору, промислові та колаборативні роботи, пневматичні клапани, RFID, перетворювачі для двигунів, поворотний стіл, ЧПК, швидке прототипіювання). Швидке створення прототипів – це група методів, які використовуються для швидкого виготовлення масштабної моделі фізичної частини або вузла з використанням тривимірних даних автоматизованого проектування.

Конструювання деталі або вузла зазвичай виконується за допомогою 3D-друку або технології «виробництва додаткових шарів». Лабораторією також можна керувати за допомогою голосового помічника Amazon Alexa.

Рисунок 1.87 – Система керування

Ідентифікація

У сфері ідентифікації (рис. 1.88) SmartTechLab включає технологію RFID (радіочастотна ідентифікація використовує електромагнітні поля для автоматичної ідентифікації та відстеження міток, прикріплених до об’єктів) і системи машинного зору. Для радіочастотної ідентифікації використовуються прилади Siemens. Ця технологія розпізнає, в якій частині лінії розташовані компоненти, для ефективного відстеження їх руху. Принцип цієї технології полягає в тому, що антена передає та приймає сигнал, який фіксує RFID-мітку, орієнтовану на об’єкт ідентифікації. Сигнал передається за допомогою радіочастотних хвиль і обробляється за допомогою пристрою для зчитування.

В якості технології машинного зору використовуються пристрої KEYENCE – промислові камери (CA-H048MX і CA-H048CX) і лазерний профілометр (LJ-X8020). Ця система має на меті замінити людину в процесі огляду об’єктів. Таким чином контроль продукту є швидшим, точнішим і надійнішим. Принцип роботи технології машинного зору полягає в автоматичному скануванні продукції за допомогою лазерів, камер і додаткового освітлення. Вся система контролюється блоком керування (рис. 1.89 – праворуч), підключеним до комп’ютера, де в програмному забезпеченні можна вибрати різні засоби ідентифікації.

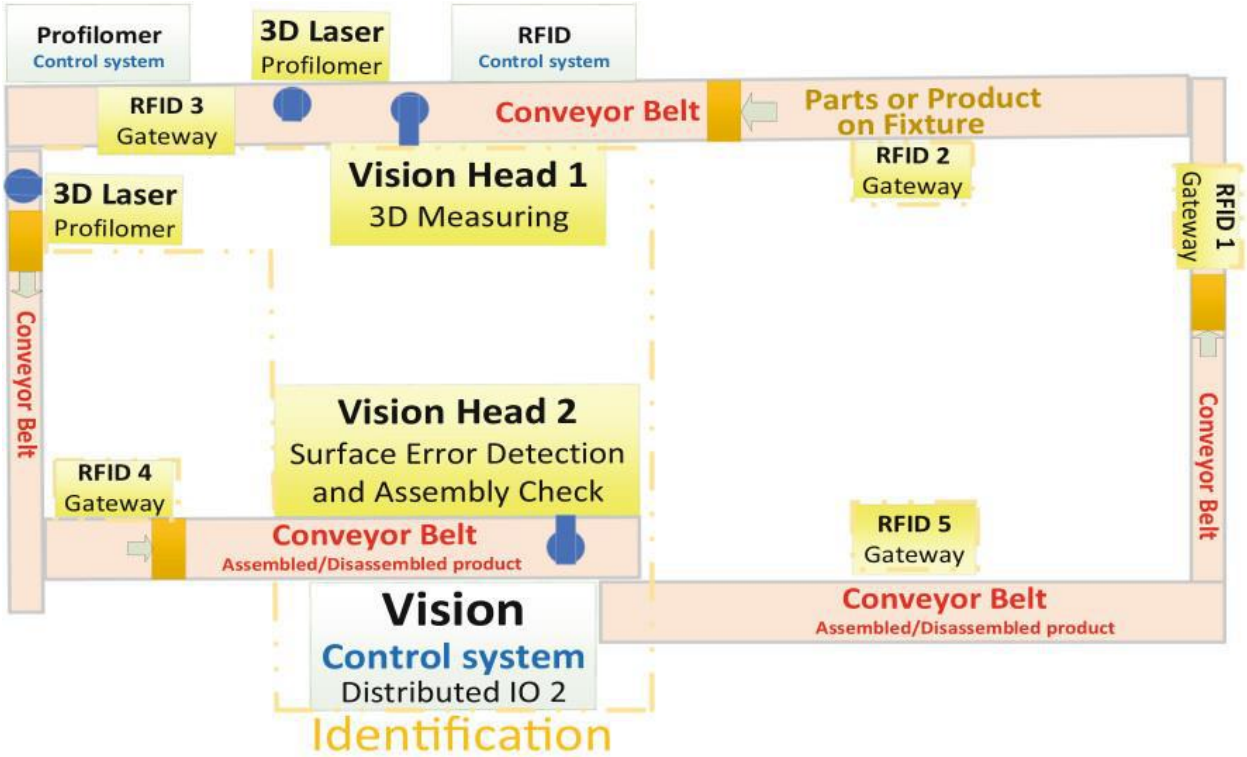


Рисунок 1.88 – Схема системи ідентифікації

Програмне забезпечення для камер серії Keyence CV-X і профілометрів серії LJ-X пропонує кілька категорій інструментів для перевірки: 3D-присутність/порівняння, висота, наявність/відсутність, виявлення дефектів, вирівнювання, вимірювання та розміри, підрахунок, ідентифікатор, графічний дисплей і математичні операції.

В лабораторії є дві станції вимірювання машинного зору. Одна із них (рис. 1.89 – ліворуч) використовується для 3D-сканування (процес аналізу реального

об’єкта чи середовища для збору даних про його форму. Зібрані дані потім можна використовувати для побудови цифрових 3D-моделей) об’єктів за допомогою білого структурованого освітлення (CA-DQP12X). Це світло освітлює об’єкт із восьми напрямків, дозволяючи системі камери оцінювати висоту об’єкта та інші параметри для 3D-виявлення на основі відбиття світла (див. рис. 1.89 – посередині).

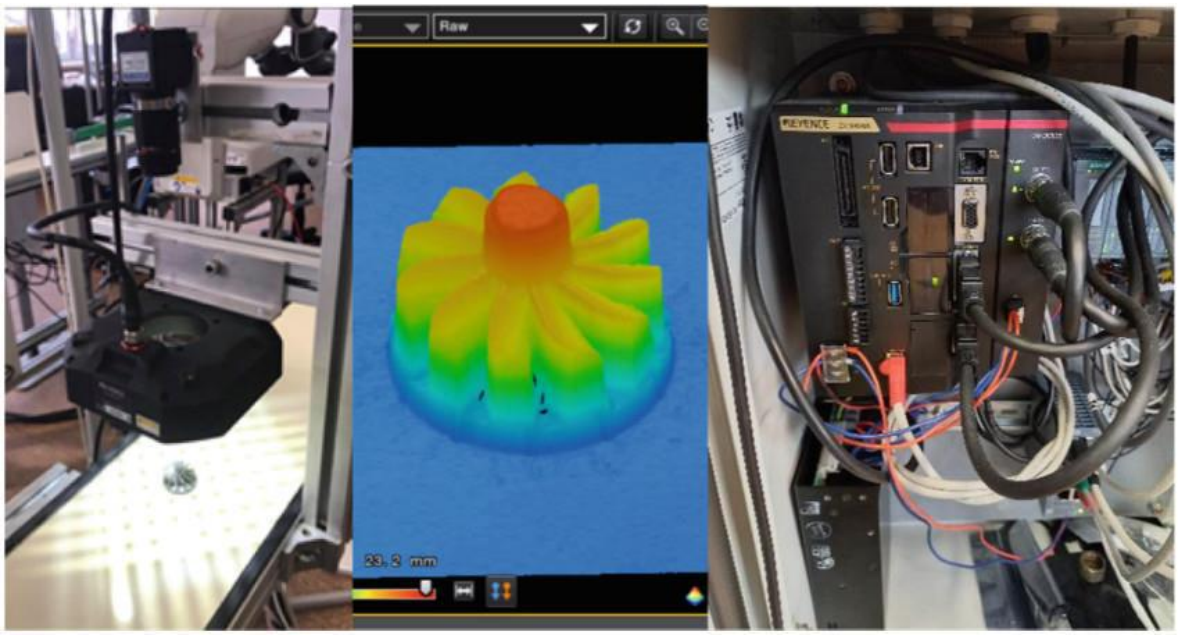


Рисунок 1.89 – Машинний зір – 3D-ідентифікація

Друга станція використовує мультиспектральне освітлення (CA-DRM10X), яке пропонує вісім різних довжин світлових хвиль. Вона може виявляти різні дефекти поверхні за допомогою різних кольорів освітлення: ультрафіолетового, синього, помаранчевого, червоного, інфрачервоного, дальнього червоного, зеленого та білого (рис. 1.90).

На рисунку 1.90 (внизу) показана ідентифікація одного і того ж об’єкта, водночас за допомогою різного типу світла (білого та інфрачервоного).

Збирання та оцифрування знань

Схему отримання та оцифрування знань можна побачити на рис. 1.91. Дані з автоматичної конвеєрної лінії відображаються на 6 рідкокристалічних моніторах (рис. 1.92), які використовуються для візуалізації всієї необхідної

інформації. Таким чином, працівники контролюють весь процес складання в режимі реального часу з усіма відповідними даними.

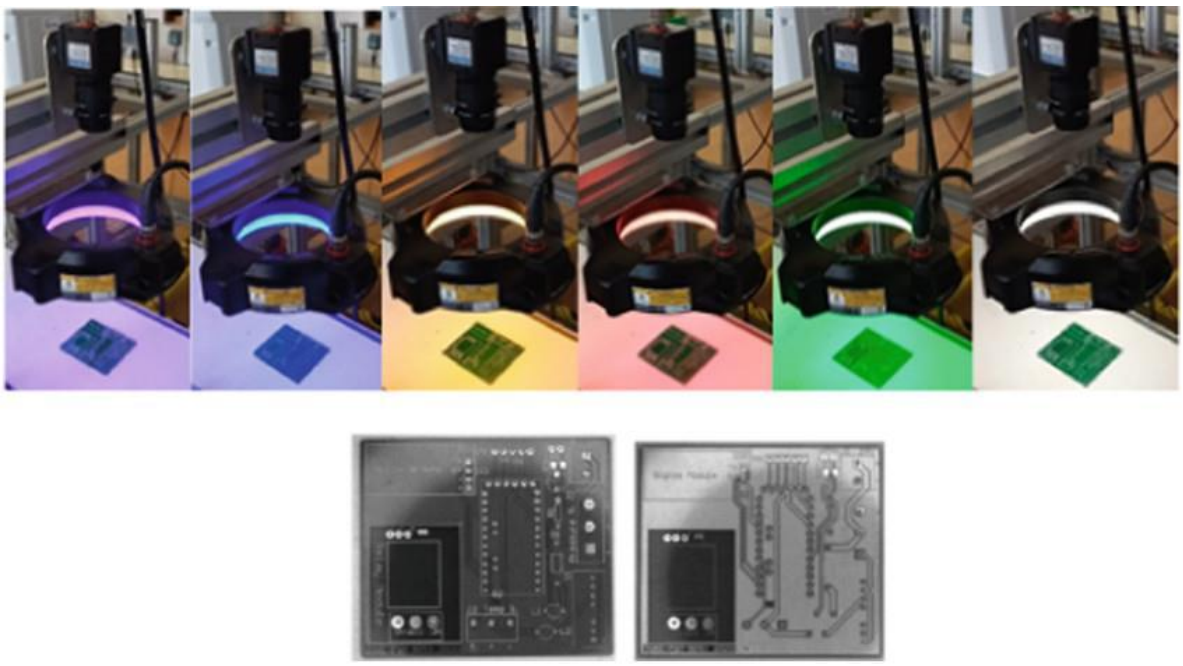


Рисунок 1.90 – Машинний зір – мультиспектральна ідентифікація

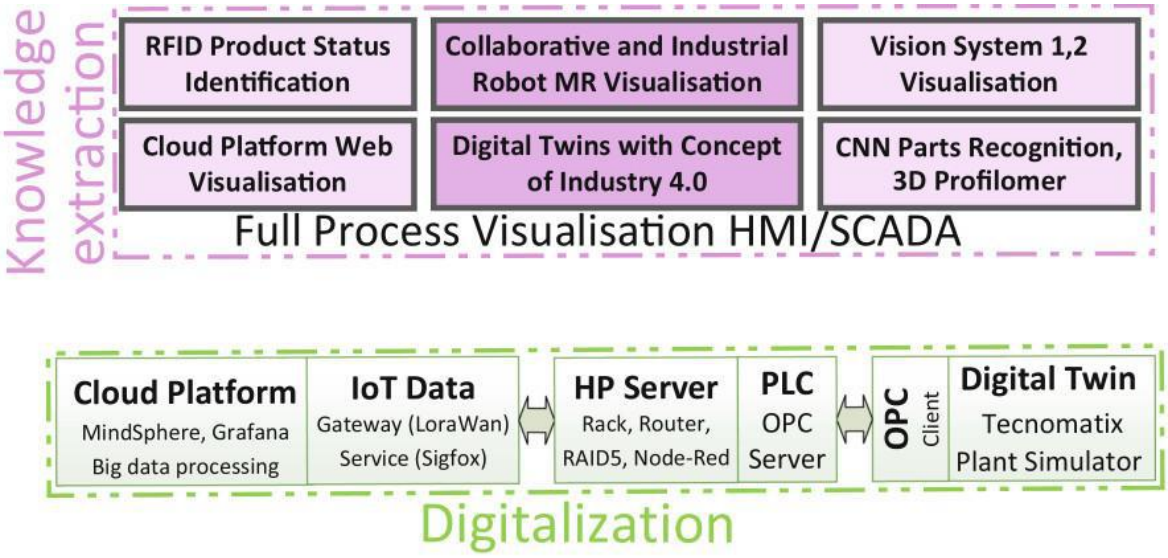


Рисунок 1.91 – Схема системи збирання знань і оцифрування

Для збору даних використовуються два сервери, перший збирає дані від PLC до платформи MindSphere, а другий забезпечує збір даних від датчиків, технологій ідентифікації та пристроїв IoT до відкритої платформи Grafana з базою даних Influx DB.

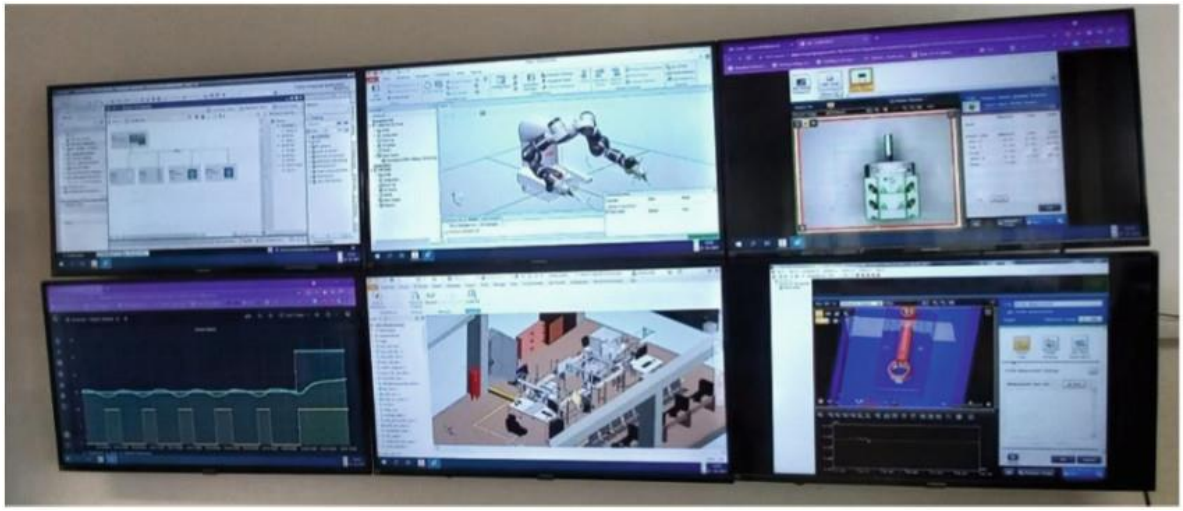


Рисунок 1.92 – Візуалізація даних

Контроль якості

Концепція системи контролю якості для 3D-друку була розроблена так, як вона представлена на рис. 1.93. Ця система розділена на послідовні в часі три частини: стадії підготовки, стадії виробництва та стадії після виробництва. Фаза контролю на кожній стадії здійснюється користувачем (стадії підготовки), система онлайн-моніторингу, включаючи камери, лазерний датчик переміщення (стадія виробництва) і камеру, профілометр, 3D-сканер і скануючий електронний мікроскоп (стадія після виготовлення).

Результатом етапів підготовки є віртуальний 3D об’єкт з теоретичною хмарою точок, результатом етапу виготовлення є реальний 3D об’єкт і база даних (реальна хмара точок), що характеризує якість об’єкта та зміну розміру об’єкта утворюваного пошарово. Результатом пост-виробничого етапу є база даних, що характеризує кінцеву якість об'єкта (геометрія, обробка поверхні, рельєф поверхні, властивості матеріалів). Відомо, що якість об’єкта визначається його геометрією, обробкою поверхні, рельєфом поверхні, властивостями матеріалів. Остаточні значення кожного з цих показників формуються в процесі друку кожного шару об'єкта. Тому для забезпечення якості 3D об’єкта необхідно розробити систему онлайн-моніторингу на етапі виготовлення, при цьому особливу увагу потрібно приділяти діагностиці друку 1-го шару, оскільки вона визначає експлуатаційні характеристики друкованого об’єкту.

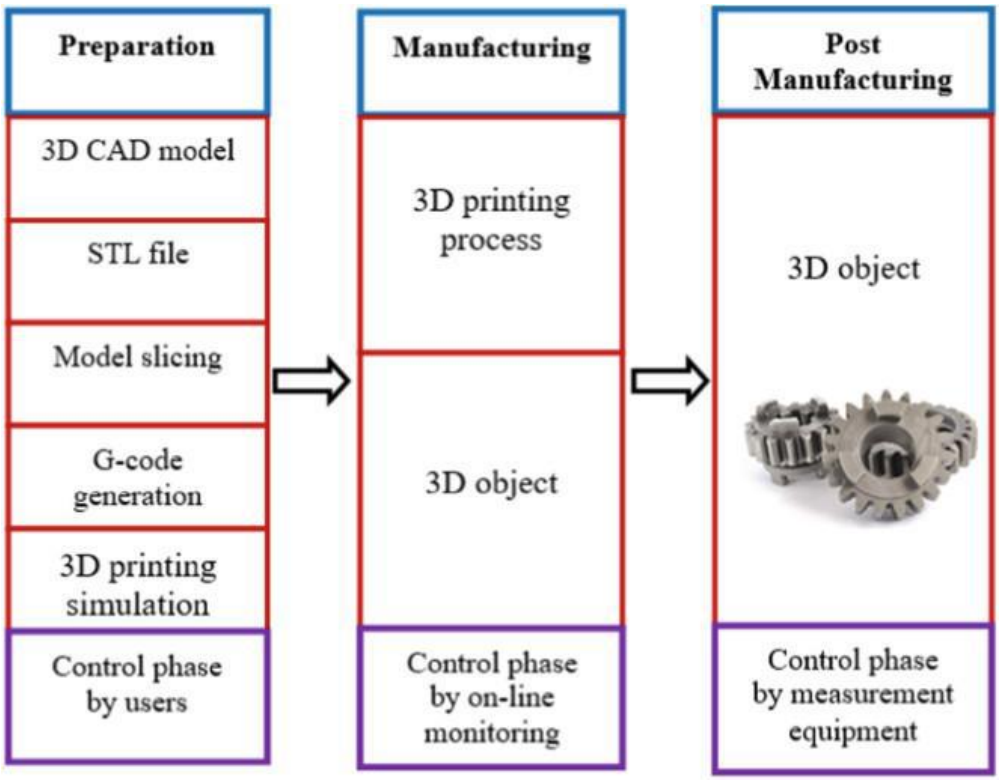


Рисунок 1.93 – Система контролю якості

Архітектура системи складається з двох частин, включаючи апаратну та програмну частину. Як приклад контролю якості 3D-друку запропоновано систему згідно з рис. 1.94. Апаратна частина складається з 3D-принтера (Creality CR-10 MAX, Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd), лазерного датчика переміщення (ILD 1420–10, Micro-Epsilon), камери та ПК (рис. 1.94).

3D-принтер Creality CR-10 MAX реалізує технологію формування FDM для нитки PLA (діаметр 1,75 мм). FDM – це моделювання плавленого осадження, також відоме як виготовлення плавлених ниток (FFF). У FDM об’єкт будується шляхом вибіркового осадження розплавленого матеріалу за заздалегідь визначеним шляхом, шар за шаром. Після створення 3D-моделі в таких програмах моделювання, як SolidWorks або Autodesk Inventor, вона імпортується до програмного забезпечення Cura, яке перетворює 3D-моделі на команди 3D-друку. Результатом цього етапу є G-код, який містить координати X, Y і Z, до яких мають переміститися друкуюча головка та платформа для створення 3D-моделі. Потім процес 3D-друку моделюється за допомогою G-коду. На наступному етапі створюється структура, що містить кожен шлях 3D-принтера,

і, нарешті, ці траєкторії відбираються, генеруючи теоретичну хмару точок 3D-моделі.

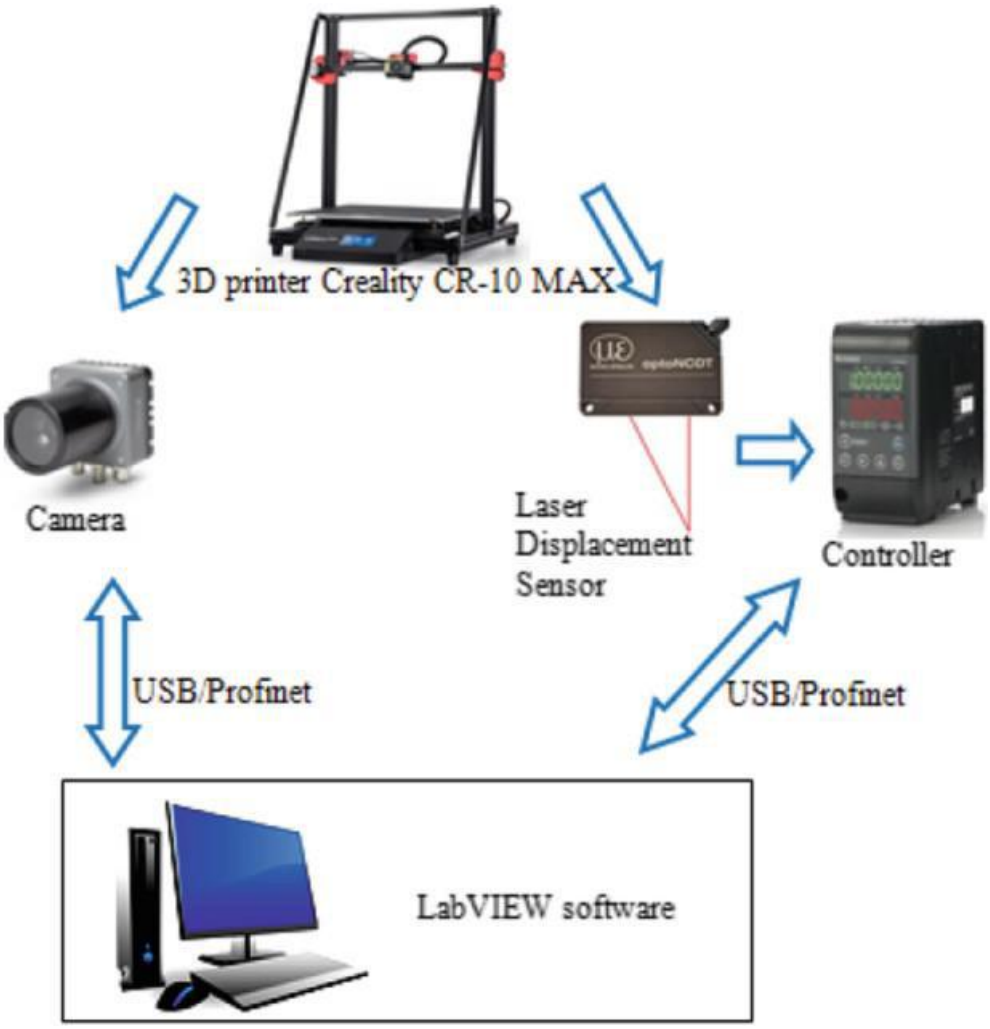


Рисунок 1.94 – Схема системи моніторингу 3D друку

Основний принцип вимірювання лазерного датчика переміщення заснований на тріангуляції. Наприклад, для ILD1420–10 швидкість вимірювання становить 4 кГц, повторюваність 0,5 мкм, діапазон вимірювання 10 мм, лінійність <±8 мкм, діаметр світлової плями 45 × 40 мкм. Лазерний датчик переміщення призначений для вимірювання переміщення, відстані та товщини поверхонь. У процесі 3D-друку за допомогою цього датчика можна визначити зміну по осі координати, що характеризує положення нитки відносно площини столу. Цей датчик підключається до ПК з LabVIEW через контролер сумісний з USB / Profinet.

У 3D-друку можлива поява спотворень, викликаних зміною температури або швидкості подачі нитки; тріщини в результаті відсутності адгезії між сусідніми шарами; отвори; низька якість з’єднання між ниткою та будівельною платформою або прошарками; усадка; викривлення та помилка позиції продукту. Для моніторингу в реальному часі можна вибрати такі типи камер: паралельна цифрова камера або камери Camera Link. Апаратне та програмне забезпечення National Instruments (NI) підтримує камери, які сумісні з шиною USB 3 Vision. Модуль розробки NI Vision підтримується LabVIEW і призначений для обробки й аналізу зображень. У Vision Development Module є сотні алгоритмів обробки зображень і функцій машинного зору для покращення зображень, визначення місцезнаходження об’єктів, ідентифікації об’єктів і вимірювання частин. У 3D-друку на основі FDM нитка наноситься шар за шаром, а складені шари спостерігаються зверху та збоку, тому найдоцільніше вибрати бокове розташування камер.

1.3.3 Фундаментальний підхід до аналізу динамічних характеристик верстатних пристроїв

Верстатні пристрої використовуються для забезпечення точного розміщення та надійного затискання заготовок під час обробки на верстатах і є невід'ємною частиною замкненої технологічної системи «верстат-кріплення-ріжучий інструмент-заготовка». Верстатний пристрій значно впливає на вихід конкурентних продуктів, забезпечуючи стабільну точність та якість робочих поверхонь, достатню жорсткість технологічної системи, гнучкість виробництва та початкові витрати кінцевого продукту. Він підтверджується відсотковою кількістю пристроїв, що складає 70–80% від загальної кількості оснастки, 10–20% від загальної вартості виробничої системи, 80–90% від загального часу для планування виробництва, 40% від сумарної похибки деталі після її обробки внаслідок недосконалої конструкції пристрою, 70% нових пристроїв – це модифікація існуючих [341, 342, 343, 344 та 345].

Крім того, більшість існуючих методів розрахунку не включають динамічні характеристики процесу різання та взаємодію заготовки з елементами пристрою.

Тому проблема проектування верстатних пристроїв є дуже нагальною і стосується основних мультидисциплінарних наукових та практичних завдань щодо забезпечення стабільного розміщення заготовки в пристрої під час обробки поверхонь деталей.

В даний час розробляються різні підходи до проектування та дослідження кріплення для здійснення виробничих операцій обробки частин різних типів.

З метою визначення сучасного стану досліджень у розробленні верстатних пристроїв та визначення актуальності напрямку дослідження були розглянуті основні підходи до проектування пристроїв з точки зору взаємодії між ними та заготовкою.

Тертя між елементами пристрою та заготовкою було досліджено і визначало деформації, які з’являються в точках контакту [346]. Була розроблена методологія моделювання системи «пристрій - заготовка» та вплив попереднього навантаження від дії затискаючих та ріжучих сил на похибку робочої поверхні [347]. Була розроблена методологія аналізу стабільності системи «пристрій - заготовка» та розрахунок мінімальної сили затискання, необхідної для процесу обробки; також було досліджено вплив послідовності затискання заготовки [348]. Вплив способів різання та відповідності пристрою на стабільність заготовки аналітично розраховували та досліджували в [349]. Спрощена аналітична модель контактної взаємодії між стисненням елементів пристрою та заготовки та розробленою скінчено-елементною моделлю дозволяє оцінювати контактну деформацію в контактних точках між елементами затискання та заготовкою [350]. Була розроблена модель визначення скінчених елементів. Стабільність розміщення заготовки в пристрої та методологія оптимізації попереднього завантаження була розроблена в [351]. Була розроблена математична модель взаємодії пристрою з заготовкою та аналіз детермінованого позиціонування пристрою [352].

Було реалізовано багато досліджень точності пристрою та аналізу стабільності закріплення, виходячи з врахування двовимірної проблеми та впровадження «оперативного фактору», який враховує сили тертя [353]. Методологія визначення точок та сил затискання для забезпечення стабільного розміщення заготовки у пристрої була розроблена в [354]. Методологія контролю сили затискання з урахуванням контактної взаємодії між заготовкою та стисненням елементів за допомогою методів нелінійного програмування розглядалась в [355]. Проблема тимчасовості стабільності закріплення, що враховує обмеження сили та напрямку його дії в системі "пристрій - заготовка" було досліджено в [356]. Вплив видалення матеріалів на динамічний стан системи «пристрій-заготовка» розглядався на відміну від квазі-статичного підходу попередників в [357]. Суттєвий досвід дослідження механічної системи «пристрій - заготовка» було отримано з точки зору забезпечення стану стабільного розміщення заготовки в пристрої в [358, 359].

Враховуючи, що існуюча інформація про визначення точок контакту функціональних елементів пристрою, які виконують функції базування та закріплення, має експертний характер і не ґрунтується на аналітичних дослідженнях; ґрунтується на тому, що існуючі методології розрахунку сил затискачів не включають умову стабільності заготовки та забезпечують необґрунтовано завищену величину, виконання зазначених досліджень є актуальним завданням.

Ця робота орієнтована на базування та затискання призматичних деталей у пристроях під час обробки на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах. Характерною особливістю цієї схеми є те, що три плоскі поверхні використовуються як технологічні бази (схема базування 3-2-1), забезпечуючи стабільність, зручність розташування та запобігання коливань під час оброблення [360].

Метою пропонованої роботи є розробка фундаментального підходу до математичного моделювання системи «пристрій – заготовка» на основі технологічних особливостей процесу розміщення та затискання заготовки в

пристрої з урахуванням динамічного аналізу заготовки в пристосуванні під дією просторової системи сил різання та затиску.

Матеріали та методи

1. Динамічне рівняння

Розглянемо консервативну механічну систему, яка складається із заготовки, затиснутої в 6 опорах 1, 2, …, 6 у глобальній ортогональній системі координат XYZ з центром у точці O (рис. 1.95).

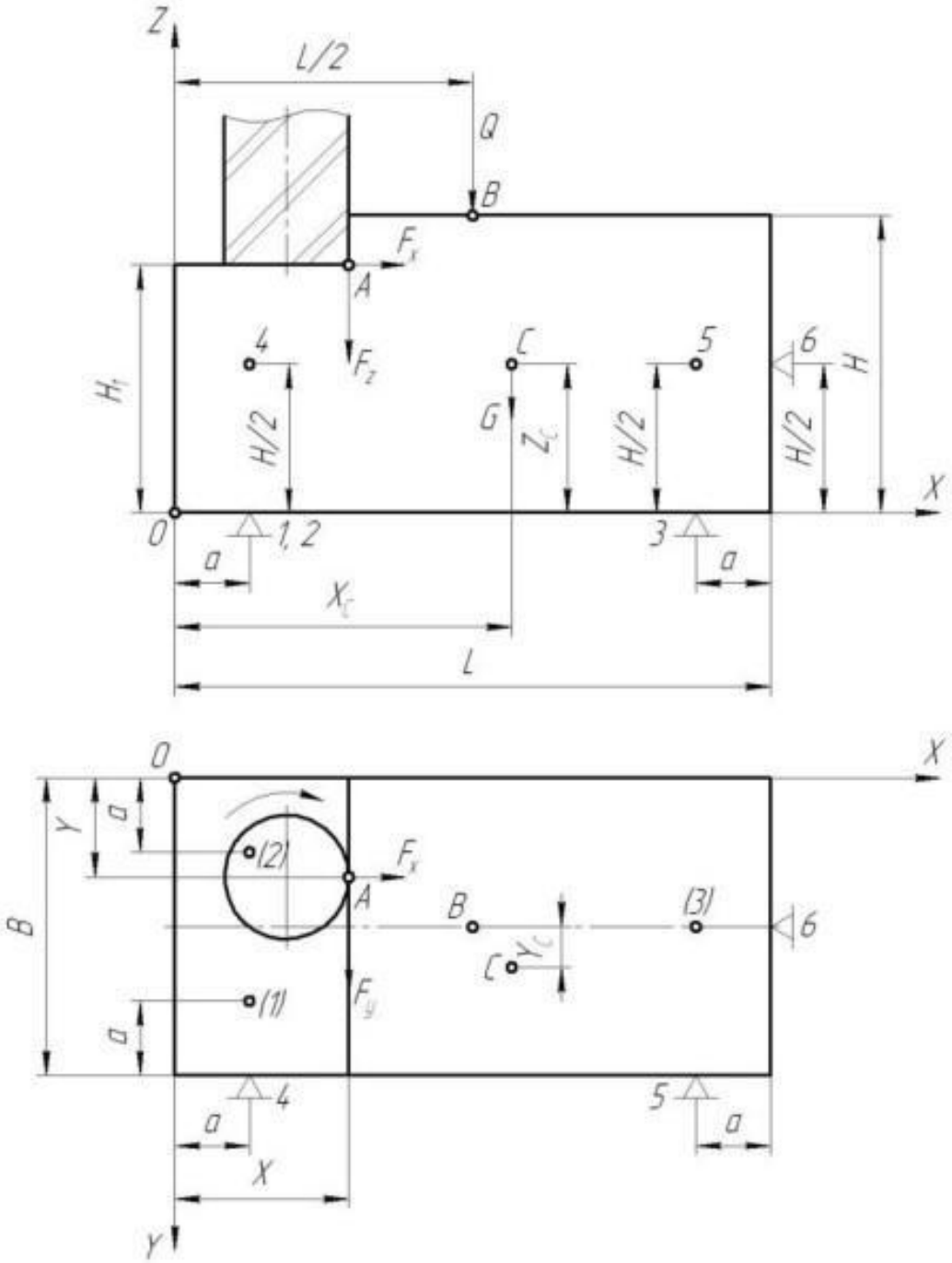


Рисунок 1.95 – Розрахункова схема механічної системи «пристрій–заготовка»

Зовнішні активні сили:

• компоненти сили різання FX, FY та FZ, застосовуються в точці A (X, Y, H1);

• Сила затискання Q, застосовується в точці B (L/2, B/2, H);

• Вага заготовки G, прикладена в центрі ваги C (XC, YC, ZC).

Розглянемо просторовий рух заготовки, розрахункова схема якої представлена на рис. 1.96.

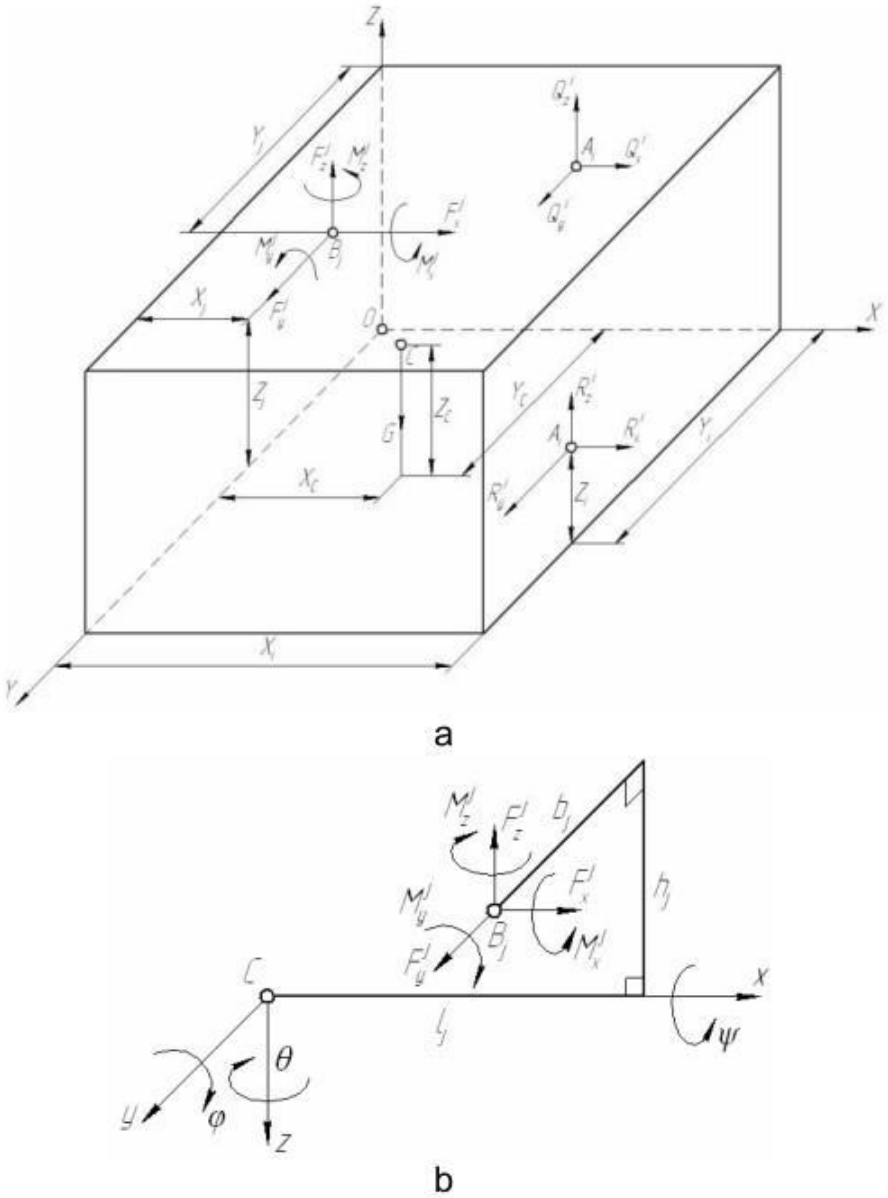


Рисунок 1.96 – Розрахункова схема (a) та система динамічних складових сил різання (b)

Переміщення xi, yi, zi опорних поверхонь заготовки в пристрої щодо стаціонарного положення, яке характеризується статичним зміщенням, визначене в результаті статичного розрахунку, можна виразити геометричною залежністю через 6 незалежних параметрів – ступенів вільності заготовки (рис. 1.97):

• складові зміщення центру ваг xC, yC, zC;

• кути повороту φ, ψ, θ трьох взаємно перпендикулярних площин y-z, x-z, x-y навколо осей x, y, z місцевої системи координат, які проходять через центр ваги заготовки C:

$$\begin{aligned} x_i &= x_C - \Delta x_i^{/} + \Delta x_i^{//}; \\ y_i &= y_C + \Delta y_i^{/} + \Delta y_i^{///}; \\ z_i &= z_C + \Delta z_i^{//} + \Delta z_i^{///}, \end{aligned} \tag{1.20}$$

де Δxi /, Δxi //, Δyi /, Δyi ///, Δzi //, Δzi ///-додаткові переміщення SUP-портів через кути обертання φ, ψ, θ, визначається тригонометричними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \Delta x_i^{/} &= b_i \sin\theta + l_i(1-\cos\theta); \\ \Delta y_i^{/} &= l_i \sin\theta - b_i(1-\cos\theta); \\ \Delta x_i^{//} &= h_i \sin\varphi - l_i(1-\cos\varphi); \\ \Delta z_i^{//} &= l_i \sin\varphi + h_i(1-\cos\varphi); \\ \Delta y_i^{///} &= h_i \sin\psi - b_i(1-\cos\psi); \\ \Delta z_i^{///} &= b_i \sin\psi + h_i(1-\cos\psi). \end{aligned} \tag{1.21}$$

Параметри li, bi, hi – локальні координати позиційних елементів 1, 2, …, 6, пов’язані з глобальними координатами Xi, Yi, Zi співвідношеннями:

$$l_i = X_i - X_C; \quad b_i = Y_i - Y_C; \quad h_i = Z_i - Z_C. \tag{1.22}$$

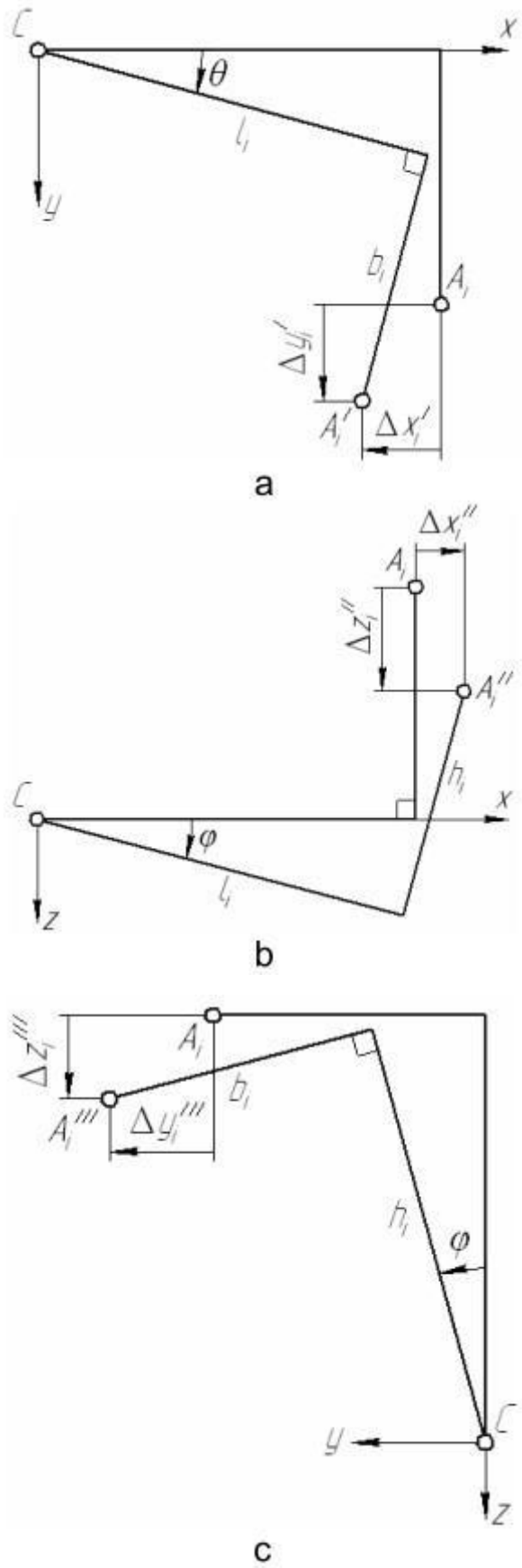


Рисунок 1.97 – Геометричні співвідношення для визначення додаткових переміщень: Δxi/, ΔYi/ (a); Δxi //, Δzi // (b); ΔYi ///, Δzi /// (c)

Для відносно малих значень деформації опор твердження (1.21) можна розкласти в ряд Маклорена, що містить члени першого порядку малості:

$$\begin{aligned} &\Delta x_i^{/} = b_i\theta, \quad \Delta x_i^{//} = h_i\varphi; \\ &\Delta y_i^{/} = l_i\theta, \quad \Delta y_i^{///} = h_i\psi; \\ &\Delta z_i^{//} = l_i\varphi, \quad \Delta z_i^{///} = b_i\psi. \end{aligned} \tag{1.23}$$

Тут компоненти переміщень опор (1.20) приймають форму:

$$\begin{aligned} x_i &= x_C - b_i\theta + h_i\varphi; \\ y_i &= y_C + l_i\theta + h_i\psi; \\ z_i &= z_C + l_i\varphi + b_i\psi. \end{aligned} \tag{1.24}$$

Просторовий рух заготовки в пристрої може бути описаний за допомогою теореми про рух центру ваги та теореми про заміну кутового імпульсу механічної системи в проекціях на осі локальної системи координат xyz:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_C = \Sigma F_{sx}^{i}; \quad m\ddot{y}_C = \Sigma F_{sy}^{i}; \quad m\ddot{z}_C = \Sigma F_{sz}^{i}; \\ J_{Cx}\ddot{\psi} = \Sigma M_{sx}^{i}; \quad J_{Cy}\ddot{\varphi} = \Sigma M_{sy}^{i}; \quad J_{Cz}\ddot{\theta} = \Sigma M_{sz}^{i}, \end{cases} \tag{1.25}$$

де m – вага заготовки; J_{CX}, J_{CY}, J_{CZ} – моменти інерції заготовки відносно осі, які проходять через центр ваги; x_C, y_C, z_C – проекції прискорення центру ваги в системі координат; ψ, φ, θ – кутове прискорення заготовки відносно осей координат.

Компоненти пружинних сил та їх моменти (рис. 1.96b) відносно координатних осей, враховуючи співвідношення (1.24), визначаються формулами (1.26). Формули (1.26) дозволяють представити рівняння, встановлені в іншій формі (1.27).

$$\begin{aligned}
&\Sigma F_{sx}^{i} = -\Sigma k_x^i x_i = -\Sigma k_x^i \left(x_C - b_i\theta + h_i\varphi\right);\\
&\Sigma F_{sy}^{i} = -\Sigma k_y^i y_i = -\Sigma k_y^i \left(y_C + l_i\theta + h_i\psi\right);\\
&\Sigma F_{sz}^{i} = -\Sigma k_z^i z_i = -\Sigma k_z^i \left(z_C + l_i\varphi + b_i\psi\right);\\
&\Sigma M_{sx}^{i} = \Sigma\left(-F_{sy}^i h_i - F_{sz}^i b_i\right) = -\Sigma\left[k_y^i h_i\left(y_C + l_i\theta + h_i\psi\right) + k_z^i b_i\left(z_C + l_i\varphi + b_i\psi\right)\right];\\
&\Sigma M_{sy}^{i} = \Sigma\left(-F_{sx}^i h_i - F_{sz}^i l_i\right) = -\Sigma\left[k_x^i h_i\left(x_C - b_i\theta + h_i\varphi\right) + k_z^i l_i\left(z_C + l_i\varphi + b_i\psi\right)\right];\\
&\Sigma M_{sx}^{i} = \Sigma\left(F_{sx}^i b_i - F_{sy}^i l_i\right) = -\Sigma\left[-k_x^i b_i\left(x_C - b_i\theta + h_i\varphi\right) + k_y^i l_i\left(y_C + l_i\theta + h_i\psi\right)\right].
\end{aligned} \tag{1.26}$$

$$\begin{cases}
m\ddot{x}_C + \Sigma k_x^i x_C + \Sigma k_x^i h_i\varphi - \Sigma k_x^i b_i\theta = F_x;\\
m\ddot{y}_C + \Sigma k_y^i y_C + \Sigma k_y^i h_i\psi + \Sigma k_y^i l_i\theta = F_y;\\
m\ddot{z}_C + \Sigma k_z^i z_C + \Sigma k_z^i b_i\psi + \Sigma k_z^i l_i\varphi = F_z;\\
J_{Cx}\ddot{\psi} + \Sigma k_y^i h_i y_C + \Sigma k_z^i b_i z_C + \Sigma\left(k_y^i h_i^2 + k_z^i b_i^2\right)\psi + \Sigma k_z^i l_i b_i\varphi + \Sigma k_y^i l_i h_i\theta = M_x;\\
J_{Cy}\ddot{\varphi} + \Sigma k_x^i h_i x_C + \Sigma k_z^i l_i z_C + \Sigma k_z^i l_i b_i\psi + \Sigma\left(k_x^i h_i^2 + k_z^i l_i^2\right)\varphi - \Sigma k_x^i b_i h_i\theta = M_y;\\
J_{Cz}\ddot{\theta} - \Sigma k_x^i b_i x_C + \Sigma k_y^i l_i y_C + \Sigma k_y^i l_i h_i\psi - \Sigma k_x^i b_i h_i\varphi + \Sigma\left(k_x^i b_i^2 + k_y^i l_i^2\right)\theta = M_z,
\end{cases} \tag{1.27}$$

де m – маса заготовки; J_{Cx}, J_{Cy}, J_{Cz} – моменти інерції заготовки відносно осі, що проходить через центр ваги; x_C, y_C, z_C – проекції прискорення центра ваги на систему координат; ψ, φ, θ – кутове прискорення заготовки відносно осей координат; F_x, F_y, F_z – динамічні складові сил різання (рис. 1.96а).

Таким чином, математична модель динамічного аналізу заготовки в пристрої описується системою диференціальних рівнянь 12-го порядку щодо 6 змінних у часі незалежних параметрів x_C, y_C, z_C, φ, ψ, θ.

2. Дослідження вільних коливань

Що стосується нульового значення сил та моментів різання, рівняння встановлені (8) у матричній формі приймають таку форму:

$$[M]\{\ddot{X}_C\} + [K]\{X\} = \{0\}, \tag{1.28}$$

де $\{0\} = \{0, 0,\ldots, 0\}^T$ – нульовий вектор-стовпчик зовнішньої дії; {X} = {xs, ys, ZS, φ, ψ, θ}^{T} – вектор-стовпчик бажаного переміщення; [M], [k] – симетричні матриці інерції та жорсткості:

$$[M]=[M]^T=\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{Cx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{Cy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{Cz} \end{bmatrix}; \tag{1.29}$$

$$[K]=[K]^T=\begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 & 0 & k_{x\varphi} & -k_{x\theta} \\ 0 & k_{yy} & 0 & k_{y\psi} & 0 & k_{y\theta} \\ 0 & 0 & k_{zz} & k_{z\psi} & k_{z\varphi} & 0 \\ 0 & k_{y\psi} & k_{z\psi} & k_{\psi\psi} & k_{\psi\varphi} & k_{\psi\theta} \\ k_{x\varphi} & 0 & k_{z\varphi} & k_{\psi\varphi} & k_{\varphi\varphi} & -k_{\varphi\theta} \\ -k_{x\theta} & k_{y\theta} & 0 & k_{\psi\theta} & -k_{\varphi\theta} & k_{\theta\theta} \end{bmatrix}. \tag{1.30}$$

Матриця жорсткості [K] включає 6 зведених коефіцієнтів односпрямованої жорсткості

$$\begin{aligned} & k_{xx}=\Sigma k_x^i; \quad k_{yy}=\Sigma k_y^i; \\ & k_{zz}=\Sigma k_z^i; \\ & k_{\psi\psi}=\Sigma\left(k_y^i h_i^2+k_z^i b_i^2\right); \\ & k_{\varphi\varphi}=\Sigma\left(k_x^i h_i^2+k_z^i l_i^2\right); \\ & k_{\theta\theta}=\Sigma\left(k_x^i b_i^2+k_y^i l_i^2\right) \end{aligned} \tag{1.31}$$

та 9 зведених коефіцієнтів поперечної жорсткості:

$$\begin{aligned} & k_{x\varphi}=\Sigma k_x^i h_i;\, k_{x\theta}=\Sigma k_x^i b_i;\, k_{y\psi}=\Sigma k_y^i h_i; \\ & k_{y\theta}=\Sigma k_y^i l_i;\, k_{z\psi}=\Sigma k_z^i b_i;\, k_{z\varphi}=\Sigma k_z^i l_i; \\ & k_{\psi\varphi}=\Sigma k_z^i l_i b_i;\, k_{\psi\theta}=\Sigma k_y^i l_i h_i;\, k_{\varphi\theta}=\Sigma k_x^i b_i h_i, \end{aligned} \tag{1.32}$$

які залежать від жорсткості та розташування підтримуючої поверхні.

Під час обробки призматичної заготовки з центром ваги C (L/2, B/2, H/2) для схеми базування 3-2-1 у трьох площинах беруть коефіцієнти жорсткості

$$
\begin{aligned}
&k_{xx} = \frac{1}{2} k_{yy} = k_2; \\
&k_{zz} = 3k_1; \\
&k_{\psi\psi} = \frac{1}{2} k_1 (B - 2a)^2; \\
&k_{\varphi\varphi} = \frac{3}{4} k_1 (L - 2a)^2; \\
&k_{\theta\theta} = \frac{1}{2} k_2 (L - 2a)^2; \\
&k_{z\varphi} = -\frac{1}{2} k_1 (L - 2a),
\end{aligned}
\tag{1.33}
$$

інші 8 коефіцієнтів поперечної жорсткості беруть нульовими.

Для того, щоб врахувати жорсткість ріжучого інструменту та затискаюльного елемента, слід враховувати коефіцієнт жорсткості затискального елемента k_3) і кутову (навколо осі z) жорсткість ріжучого інструменту (приклад – кінцеві фрези), які можна було б приблизно оцінити наступними приблизними залежностями, які визначають відповідний стан напружень (стиснення, згинання та кручення):

$$
k_p = \frac{\pi d^2 E}{4L_p}; \quad k_p^{/} = \frac{3\pi d^4 E}{32 L_p^3}; \quad k_p^{//} = \frac{\pi d^4 E}{64(1+\nu) L_p}, \tag{1.34}
$$

де d, L_p – діаметр і довжина млина; E, ν – модуль пружності першого порядку та коефіцієнт Пуассона матеріалу фрези.

Зведені коефіцієнти прямої та поперечної жорсткості з урахуванням жорсткості різальних інструментів та затискних пристроїв приймають таку форму:

$$
\begin{aligned}
&k_{xx} = k_2 + k_p^{/}; \quad k_{yy} = 2k_2 + k_p^{/}; \quad k_{zz} = 3k_1 + k_3;\\
&k_{\psi\psi} = \frac{1}{2}k_1(B-2a)^2 + k_p\left(\frac{B}{2}-Y\right)^2 + k_p^{/}\left(H_1-\frac{H}{2}\right)^2;\\
&k_{\varphi\varphi} = \frac{3}{4}k_1(L-2a)^2 + k_p\left(\frac{L}{2}-X\right)^2 + k_p^{/}\left(H_1-\frac{H}{2}\right)^2;\\
&k_{\theta\theta} = \frac{1}{2}k_2(L-2a)^2 + k_p^{/}\left[\left(\frac{L}{2}-X\right)^2 + \left(\frac{B}{2}-Y\right)^2\right] + k_p^{//};\\
&k_{x\varphi} = -k_p^{/}\left(H_1-\frac{H}{2}\right); k_{x\theta} = -k_p^{/}\left(\frac{B}{2}-Y\right);\\
&k_{y\psi} = k_p^{/}\left(H_1-\frac{H}{2}\right);\\
&k_{y\theta} = -k_p^{/}\left(\frac{L}{2}-X\right); k_{z\psi} = -k_p\left(\frac{B}{2}-Y\right);\\
&k_{z\varphi} = -\frac{1}{2}k_1(L-2a) - k_p\left(\frac{L}{2}-X\right);\\
&k_{\psi\varphi} = k_p\left(\frac{L}{2}-X\right)\left(\frac{B}{2}-Y\right);\\
&k_{\psi\theta} = -k_p^{/}\left(\frac{L}{2}-X\right)\left(H_1-\frac{H}{2}\right);\\
&k_{\varphi\theta} = -k_p^{/}\left(\frac{B}{2}-Y\right)\left(H_1-\frac{H}{2}\right).
\end{aligned}
\tag{1.35}
$$

Під час процесу різання представлені коефіцієнти жорсткості змінюють свої значення, серед них 4 – змінюють свій знак через зміну координати Y розташування ріжучого інструменту.

Для вільних коливань механічної системи «пристрій – заготовка», рішення рівняння (1.28) є гармонічним рухом, описаним наступним рівнянням:

$$\{X\} = \{X_a\}\sin\omega t, \tag{1.36}$$

який включає невідому власну частоту ω, а також вектор-стовпчик пікових значень переміщень і кутів повороту навколо локальної системи координат $\{X_a\} = \{x_{Ca}, y_{Ca}, z_{Ca}, \varphi_a, \psi_a, \theta_a\}^T$. Остання визначає форму вільних коливань системи з точністю до постійного множника.

Рівняння (1.28) з урахуванням тверджень (1.29) набуває такого вигляду:

$$\left([K]-\omega^2[M]\right)\{X_a\}=\{0\}. \tag{1.37}$$

Умова існування нетривіальних розв’язків рівняння (18) дозволяє записати частотне рівняння:

$$\left|[K]-\omega^2[M]\right|=0. \tag{1.38}$$

з якого визначаються 6 власних частот механічної системи:

$$\begin{aligned}
&\omega_1=0\sqrt{\frac{k_2}{m}};\quad \omega_2=\sqrt{\frac{2k_2}{m}};\\
&\omega_3=\sqrt{\frac{3k_1}{2}\left\{\frac{1}{m}+\frac{(L-2a)^2}{4J_{Cy}}-\sqrt{\left[\frac{1}{m}+\frac{(L-2a)^2}{4J_{Cy}}\right]^2-\frac{8(L-2a)^2}{9mJ_{Cy}}}\right\}}\\
&\omega_4=(B-2a)\sqrt{\frac{k_1}{2J_{Cx}}};\\
&\omega_5=\sqrt{\frac{3k_1}{2}\left\{\frac{1}{m}+\frac{(L-2a)^2}{4J_{Cy}}+\sqrt{\left[\frac{1}{m}+\frac{(L-2a)^2}{4J_{Cy}}\right]^2-\frac{8(L-2a)^2}{9mJ_{Cy}}}\right\}};\\
&\omega_6=(L-2a)\sqrt{\frac{k_2}{2J_{Cz}}}.
\end{aligned} \tag{1.39}$$

За умови (1.38) рівняння (1.37) має нетривіальні розв’язки, які з точністю до постійного множника визначають 6 форм вільних коливань:

$$\begin{Bmatrix} y_C^{\langle n \rangle} \\ z_C^{\langle n \rangle} \\ \varphi^{\langle n \rangle} \\ \psi^{\langle n \rangle} \\ \theta^{\langle n \rangle} \end{Bmatrix} = -\left[d_{i,j}^{\langle n \rangle}\right] \begin{Bmatrix} K_{2,1} - \omega_n^2 M_{2,1} \\ K_{3,1} - \omega_n^2 M_{3,1} \\ K_{4,1} - \omega_n^2 M_{4,1} \\ K_{5,1} - \omega_n^2 M_{5,1} \\ K_{6,1} - \omega_n^2 M_{6,1} \end{Bmatrix}, \tag{1.40}$$

де $[d^{<n>}_{i,\,j}]$ – головний діагональний мінор матриці динамічної жорсткості [D], елементи якої

$$d_{i,j}^{\langle n \rangle} = K_{i,j} - \omega_n M_{i,j}\,, \quad (i, j = 2, 3, ..., 6). \tag{1.41}$$

визначаються для певної власної частоти ω_n (n = 1, 2, …, 6).

3. Дослідження вимушених коливань

Просторовий рух заготовки в пристрої як тіла з 6 ступенями свободи в проекціях на осі локальної системи координат xyz має вигляд рівняння (1.42), яке можна подати в матричному вигляді:

$$[M]\{\ddot{X}_C\} + [K]\{X\} = \{F\}, \tag{1.42}$$

де {X} – вектор-стовпчик невідомих (шуканих) переміщень; {F} – вектор-стовпець зовнішньої динамічної дії:

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ \varphi \\ \psi \\ \theta \end{Bmatrix}; \quad \{F\} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix}. \tag{1.43}$$

При цьому моменти динамічних складових сил різання відносно осей локальної системи координат (рис. 1.86 b):

$$M_x = F_y h_A + F_z b_A;$$
$$M_y = F_x h_A + F_z l_A; \qquad (1.44)$$
$$M_z = -F_x b_A + F_y l_B.$$

Розглянемо випадок моногармонічної зовнішньої дії:

$$\{F\} = \{F_a\} \sin \omega t, \qquad (1.45)$$

де $\{F_a\}$ – вектор-стовпець амплітуд зовнішніх сил і моментів; $\omega = \omega_0 z$ – частота, яка дорівнює добутку частоти обертання шпинделя на кількість зубців z ріжучого інструменту.

Розв’язок рівняння (1.42) шукаємо у вигляді

$$\{X\} = \{X_a\} \sin \omega t. \qquad (1.46)$$

Для вектор-стовпця $\{X_a\}$, елементами якого є амплітуди переміщення центру ваги та кути повороту навколо осей координат.

Підстановка твердження (1.46) у рівняння (1.42) дозволяє записати рівняння

$$\left([K] - \omega^2 [M]\right)\{X_a\} = \{F_a\}, \qquad (1.47)$$

розв’язком якого є

$$\{X_a\} = \left([K] - \omega^2 [M]\right)^{-1} \{F_a\}. \qquad (1.48)$$

Залежність компоненти X_{ai} вектор-стовпчика $\{X_a\}$ від частоти зовнішньої дії ω визначає АЧХ механічної системи «пристрій – заготовка».

Для схеми базування 3-2-1 по 3-х площинах значення частоти переміщень центру ваги заготовки і кутів повороту навколо осей координат мають такий вигляд:

$$
\begin{aligned}
x_{Ca}(\omega) &= \frac{F_{xa}/m}{\omega_1^2-\omega^2};\\
y_{Ca}(\omega) &= \frac{F_{ya}/m}{\omega_2^2-\omega^2};\\
z_{ca}(\omega) &= \frac{\left(\frac{k_{\varphi\varphi}}{J_{Cy}}-\omega^2\right)\frac{F_{za}}{m}-\frac{k_{z\varphi}}{J_{Cy}}\frac{M_{za}}{m}}{\left(\omega_3^2-\omega^2\right)\left(\omega_5^2-\omega^2\right)};\\
\psi_a(\omega) &= \frac{M_{xa}/J_{Cx}}{\omega_4^2-\omega^2};\\
\varphi_a(\omega) &= \frac{-\frac{k_{z\varphi}}{J_{Cy}}\frac{F_{za}}{m}+\left(\frac{k_{zz}}{m}-\omega^2\right)\frac{M_{za}}{J_{Cy}}}{\left(\omega_3^2-\omega^2\right)\left(\omega_5^2-\omega^2\right)};\\
\theta_a(\omega) &= \frac{M_{za}/J_{Cz}}{\omega_6^2-\omega^2},
\end{aligned}
\tag{1.49}
$$

де $\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_6$ – значення власних частот, визначене за допомогою модального аналізу.

За формулою переходу від зміщення центру ваги заготовки до зміщення опор

$$
\begin{aligned}
x_i &= x_C - b_i\theta + h_i\varphi;\\
y_i &= y_C + l_i\theta + h_i\psi;\\
z_i &= z_C + l_i\varphi + b_i\psi
\end{aligned}
\tag{1.50}
$$

АЧХ для опорних точок мають такий вигляд:

$$x_{ia} = \frac{F_{xa}/m}{\omega_1^2 - \omega^2} + h_i \frac{-\frac{k_{z\varphi}}{J_{Cy}}\frac{F_{za}}{m} + \left(\frac{k_{zz}}{m} - \omega^2\right)\frac{M_{za}}{J_{Cy}}}{\left(\omega_3^2 - \omega^2\right)\left(\omega_5^2 - \omega^2\right)} -$$

$$- b_i \frac{M_{za}/J_{Cz}}{\omega_6^2 - \omega^2};$$

$$y_{ia} = \frac{F_{ya}/m}{\omega_2^2 - \omega^2} + h_i \frac{M_{xa}/J_{Cx}}{\omega_4^2 - \omega^2} + l_i \frac{M_{za}/J_{Cz}}{\omega_6^2 - \omega^2}; \qquad (1.51)$$

$$z_{ia} = \frac{\left(\frac{k_{\varphi\varphi} - k_{z\varphi} l_i}{J_{Cy}} - \omega^2\right)\frac{F_{za}}{m} + \left(\frac{k_{zz} - k_{z\varphi}/l_i}{m} - \omega^2\right)\frac{M_{za} l_i}{J_{Cy}}}{\left(\omega_3^2 - \omega^2\right)\left(\omega_5^2 - \omega^2\right)} +$$

$$+ b_i \frac{M_{xa}/J_{Cx}}{\omega_4^2 - \omega^2}.$$

Так, для схеми базування 3-2-1 за трьома площинами розташування фрези Y = B/2 АЧХ системи «пристрій – заготовка» в нижніх опорних точках мають такий вигляд:

$$z_{1a} = z_{2a} = \frac{0{,}5k_1(L-2a)^2 - J_{Cy}\omega^2}{\left(\omega_3^2 - \omega^2\right)\left(\omega_5^2 - \omega^2\right)} \frac{F_{za}}{mJ_{Cy}};$$

$$z_{3a} = \frac{k_1(L-2a)^2 - J_{Cy}\omega^2}{\left(\omega_3^2 - \omega^2\right)\left(\omega_5^2 - \omega^2\right)} \frac{F_{za}}{mJ_{Cy}}. \qquad (1.52)$$

$$\omega' = (L-2a)\sqrt{\frac{k_1}{2J_{Cy}}};$$

$$\omega'' = (L-2a)\sqrt{\frac{k_1}{J_{Cy}}} = \frac{\omega'}{\sqrt{2}}; \qquad (1.53)$$

відповідають появі антирезонансного ефекту, для якого спостерігається нульове значення амплітуд z_{1a}, z_{2a}, і z_{3a}.

Результати та їх обговорення

1. Вхідні дані

Перевірку адекватності запропонованої математичної моделі проведено на прикладі розрахунку механічної системи «пристрій – заготовка» для схеми розташування на трьох площинах. Для подальших досліджень обрано призматичну заготовку габаритними розмірами 100×50×50 мм. Досліджено фрезерування буртика шириною 18 мм і глибиною різання 5 мм. Матеріал заготовки – сталь С45. Ріжучим інструментом є суцільна торцева фреза RF 100 VA DIN 6527 K з такими параметрами:

– діаметр: 20 мм;
– довжина ріжучої частини: 42 мм;
– загальна довжина: 92 мм;
– кількість зубів: 4;
– матеріал: твердий сплав.

Розраховані режими різання:

– подача на зуб: 0,05 мм/зуб;
– подача на оборот: 0,2 мм/об;
– швидкість різання: 154 мм/хв;
– швидкість обертання шпинделя: 2450 об/хв.

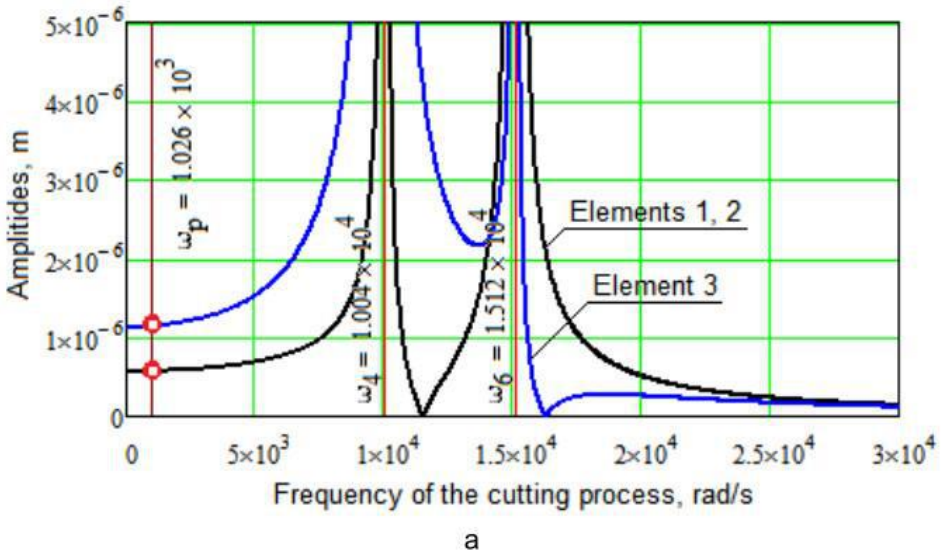
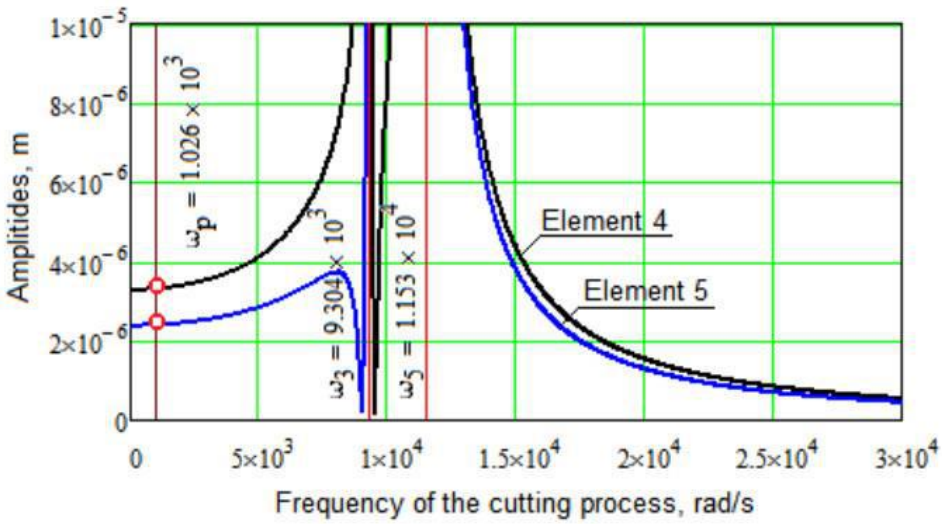
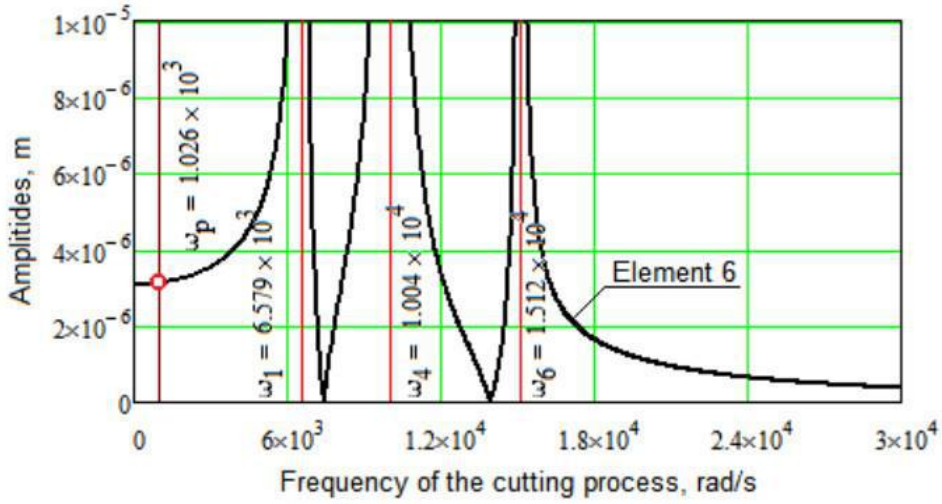


Рисунок 1.98 – АЧХ коливань функціональних елементів:
a – для елементів 1–3; b – для елементів 4–5; c – для елемента 6



b



c

Продовження рис. 1.98

Вищезазначені результати відповідають таким навантаженням при різанні:

– складові сили різання, Н: Pz = 955, Py = 381, Px = 478;

– момент різання, Н·м: Mz = 95,5.

Заготовка розташована на 6 опорах, жорсткість яких дорівнює $8{,}4 \cdot 10^7$ Н/м.

2. Результати розрахунків

Завдяки розрахункам, що були виконані з використанням чисельних методів, отримані такі дані:

– мінімальне значення сили затиску: 2,2 кН;

– маса заготовки: 1,95 кг;

– осьові моменти інерції: JCx = 8,1·10–4 кг·м2, JCy = JCz = 2,0·10–3 кг·м2;

– робоча частота процесу різання: 1026 рад/с;

– критичні частоти в порядку зростання, рад/с: ω1 = 6,6·103, ω2 = 6,8·103, ω3 = 9,3·103, ω4 = 1,0·104, ω5 = 1,2·104, ω6 = 1,5·104.

Найнижча критична частота в 6,4 рази вища за робочу частота процесу різання.

Значення динамічних складових сил різання (F_{za} = 0,2·P_z = 191 Н, F_{ya} = 0,2·P_y = 76 Н, F_{xa} = 0,2·P_x = 96 Н) і момент різання (M_{za} = 0,2·M_z = 19 Н·м) дозволяють визначити амплітуди коливань функціональних елементів на робочій частоті.

Отримані значення амплітуд (m) функціональних елементів:

– $z_{1a} = z_{2a} = 5{,}7\cdot10^{-7}$, $z_{3a} = 1{,}1\cdot10^{-6}$ для елементів, які реалізована первинна даність;

– $y_{4a} = 3{,}3\cdot10^{-6}$, y5a = $2{,}4\cdot10^{-6}$ для елементів вторинна дата;

– $x_{6a} = 3{,}1\cdot10^{-6}$ для елементів третинної бази.

Кількісні показники отриманих результатів відповідають результатам експериментальних досліджень і не перевищують допусків на виготовлення відповідних деталей для заданих умов виробництва.

1.3.4 Використання регресійного аналізу для автоматизованого вибору матеріалів у інтелектуальному виробництві

1. Вступ

Традиційно вибір конструкційних матеріалів для конструювання машин в першу чергу визначається розрахунками міцності, жорсткості, стійкості, втоми та інших статичних і динамічних навантажень [361]. Однак на сучасному глобалізованому ринку ті самі конструкційні матеріали можуть відрізнятися за фазовим складом і фізико-механічними властивостями залежно від країни-постачальника [362]. Тому проблема визначення впливу фазового складу матеріалу на його фізико-механічні властивості (пряма задача) і навпаки (зворотна задача) є актуальною в машинобудуванні. Для його вирішення потрібен комплексний аналіз баз даних для різних матеріалів, складів і

властивостей, включаючи сучасні обчислювальні засоби відповідно до тенденцій інтелектуального виробництва.

Важливість обраної теми підкреслюється наступними тенденціями відповідно до стратегії «Індустрія 4.0». По-перше, необхідно створити автоматизовані системи даних для перенесення матеріалів, складу та властивостей, а також подальшого агрегування, коли вони стають доступними та аналізуються. По-друге, незважаючи на чітку документацію щодо середніх значень складу матеріалу, що поставляється, критичні частини повинні пройти вхідний контроль фізико-механічних властивостей. Всі ці механізми особливо актуальні в турбомашинобудуванні, авіабудуванні тощо. Крім того, актуальною проблемою є необхідність автоматизації відповідної проектно-технічної документації.

У зв’язку з цим, нижче проаналізовано низку наукових робіт з розробки автоматизованих систем відбору матеріалів у інтелектуальному виробництві.

Бакхум і Браун [363] запропонували автоматизовану систему підтримки вибору конструкційних матеріалів. У результаті якість прийняття рішень сталого відбору була покращена за допомогою багатоатрибутного підходу до прийняття рішень. Колесник та ін. [364] застосовує штучні нейронні мережі для аналізу режиму обробки та точності поверхні. У результаті було оцінено точність отвору та температуру свердління для свердління сплавів CFRP/Ti.

Мафоквейн і ван Каллон [365] розробили підхід до вибору матеріалів для транспортно-розвантажувальних систем відповідно до тенденцій Industry 4.0. У результаті була підтверджена нова розрахункова структура на основні залежності міцності матеріалів від прогинів і напружень. Івченко О. та ін. [366] розроблено метод вибору умов різання. Запропонований підхід розглядав умови різання під час точного точіння нелегованої вуглецевої сталі AISI 1045.

Каземзадех і Акіс [367] описали еволюційний підхід для оптимального автоматизованого вибору композиційних матеріалів. Результати чисельного моделювання підтвердили надійність запропонованого підходу при проектуванні багатошарових композитних труб під внутрішнім тиском. Ігхаму та ін. [368] розробили автоматизований підхід до прийняття рішень щодо вибору

матеріалів та обладнання на основі багатокритеріального аналізу рішень. Запропонована методика реалізована при виборі матеріалу для водопровідних труб.

Ахмедзянов та ін. [369] реалізували автоматизований підхід вибору матеріалу для основних частин авіаційного двигуна. У результаті оцінено навантаження, що діють на елементи газоповітряного каналу двигуна. Срінівасан та ін. [370] запропоновано концепцію автоматизованого відбору матеріалів для видобутку нафти і газу. Розроблено відповідну програмну систему для реалізації конкретних рекомендацій нафтової промисловості.

Велденз та ін. [371] застосували процес аналітичної ієрархії для вибору матеріалу для автоматизованого розміщення сухого волокна. Доведено, що цей метод кращий для прогнозування якості виготовлення деталей зі складною геометрією. Панчук та ін. [372] спрогнозували точність профілю конічної різьби для випадку токарної обробки. Сео та ін. [373] реалізували тривимірне моделювання будівель на основі автоматизованого вибору матеріалів та оцінки навколишнього середовища.

Трегенрн та ін. [374] для відбору матеріалу використовували системи штучного інтелекту. У результаті було розроблено відповідну структуру для виявлення сплаву з пам’яттю форми на основі даних. Лі та ін. [375] застосували машинне навчання з покращеним генетичним алгоритмом. У результаті було реалізовано вибір дескриптора матеріалу для прогнозування твердості високоентропійних сплавів.

Лай та ін. [376] вивчали вплив вибору матеріалу на мікроструктуру нанесених покриттів з карбіду бору. Чаттерджі та Чакраборті [377] застосували багатоатрибутивний порівняльний аналіз для вибору матеріалу поршнів зі сталі AISI 4140 та сталі AISI 8660. Дель Росаріо [378] реалізував вибір матеріалу на основі статистично ретельного аналізу надійності. Запропонований підхід був доповнений статистичним моделюванням для аналізу композитних ламінатних плит.

Кумар та ін. [379] використали багатокритеріальне прийняття рішень в умовах невизначеності у виборі матеріалу. Джахан та ін. [380] застосували метод

комбінованого компромісного рішення для вибору матеріалу. У результаті комбінований метод компромісного рішення враховував вибір матеріалу для прикладних досліджень цистерн для зберігання та стін вагона.

Толедо та ін. [381] застосували багатокритеріальні засоби вибору альтернативних матеріалів в автомобільній промисловості. Фунг та ін. [382] застосували підхід структурної оптимізації для вибору матеріалів. В результаті удосконалено конструкції багатоконсольних віброенергозбирачів. Крім того, Ізонін та ін. [383] запропонували підхід для оцінки параметрів відносно невеликих наборів даних на основі нейронних мереж загальної регресії.

Алтун та ін. [384] описав підхід до визначення сил, прикладених до елементів машин, за допомогою штучних нейронних мереж. Боячі та Туземен [385] застосували різні багатокритеріальні підходи до прийняття рішень (тобто, комплексний пропорційний метод оцінки) для вибору матеріалів в аерокосмічній промисловості.

Проте, всі згадані вище підходи до вибору матеріалу мають деякі недоліки, які слід усунути. По-перше, неможливо чітко контролювати вплив фазового складу багатокомпонентних матеріалів на їх фізико-механічні властивості і навпаки. По-друге, одночасно розв'язувати пряму й зворотну задачі на основі єдиного підходу поки неможливо. По-третє, використані методи невиправдано ускладнені за застосовуваним алгоритмом і сучасними обчислювальними засобами. Ці факти вимагають потужних обчислювальних можливостей для реалізації складних алгоритмів і роблять їх теоретичний аналіз практично неможливим.

З математичної точки зору множинний регресійний аналіз можна використовувати для вирішення вищеописаних проблем. Загалом стратегії прийняття рішень з використанням множинного регресійного аналізу описані, наприклад, у [386]. Однією з останніх публікацій щодо його застосування є використання множинного регресійного аналізу для прогнозування механічних властивостей сплаву TiAl залежно від ступеня затвердіння [387].

Практичне значення запропонованої методики полягає в можливості вирішення прямої та зворотної задач автоматизованого вибору матеріалів за

допомогою єдиного підходу до проектування елементів машин у машинобудуванні, інтелектуальному виробництві та промисловому проектуванні.

Завдяки проведеному вище аналізу головною метою є розробка комплексного автоматизованого підходу до вибору матеріалів. Для досягнення цієї мети були сформульовані наступні цілі. По-перше, слід розробити аналітичний підхід до вирішення прямої та оберненої задач раціонального вибору матеріалу на основі фазового складу та фізико-механічних властивостей. По-друге, слід запропонувати матричні залежності для оцінки фізико-механічних властивостей за фазовим складом і навпаки.

Нарешті, надійність запропонованого автоматизованого підходу має бути доведена на конкретних прикладах.

Загалом, основні цілі відповідають заяві, нещодавно зробленій Кангішвар та ін. у 2022 році про необхідність досягти кращого розуміння важливості підходів до вибору матеріалів та їх адаптивності в різних застосуваннях [388].

У ході дослідження були сформульовані наступні гіпотези. По-перше, взаємозв'язки між фазовим складом певної групи матеріалів і відповідними фізичними і механічні властивості є лінійними або слабко нелінійними (в межах певної відносної похибки). По-друге, якщо залежність між фазовими складами і фізико-механічними властивості для цієї групи відомі, вони будуть надійними для будь-якого невідомого матеріалу в цій групі. Усі ці гіпотези повинні бути доведені нижче практичними прикладами.

Матеріали та методи

1. Загальна методика

Запропонована методика схематично представлена на рис. 1.99. Її послідовні етапи включають проектний розрахунок. Номінальні механічні властивості визначаються шляхом аналітичних розрахунків міцності, жорсткості, стійкості тощо. Традиційно зазначені вище етапи дозволяють прийняти рішення щодо необхідного матеріалу.

Тим не менш, для критичних і високонавантажених частин у високотехнологічних галузях промисловості механічні властивості вибраних

матеріалів повинні бути підтверджені механічними випробуваннями на експериментальних зразках. Це пояснюється тим, що навіть для широко використовуваних металів і сплавів їх фізико-механічні властивості можуть істотно відрізнятися залежно від постачальника, наявності домішок і режимів термічної обробки та інших факторів.

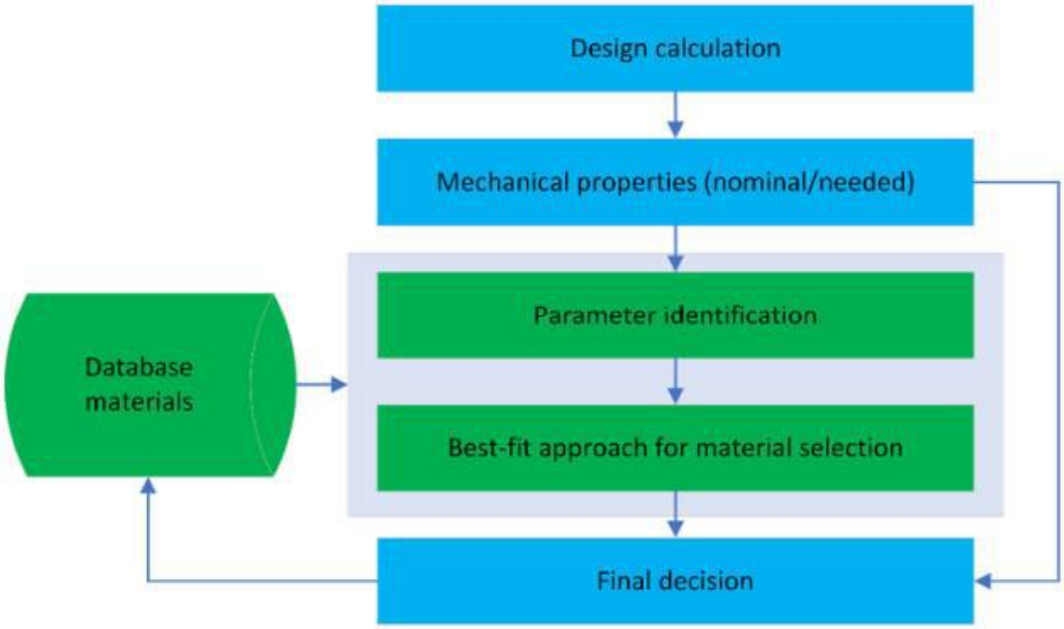


Рисунок 1.99 – Схема запропонованої методики

Наступні критерії використовуються для прийняття рішення про використання зелених блоків на рис. 1.99. По-перше, високоякісний конструкційний матеріал повинен відповідати набору проектних вимог щодо міцності конструкції. Їх слід якомога більше вибирати з кількісних характеристик, отриманих під час випробувань стандартних матеріалів, наприклад, умовна межа текучості, межа міцності на розтяг, відносне подовження, відносне звуження, твердість і межа втоми. Передбачається, що відхилення значень механічних властивостей у запропонованій методиці повинно бути не більше 5%. Це відповідає результатам роботи [389].

По-друге, фазовий склад будь-якої сталі впливає на її структурну міцність. Найважливішим елементом, що визначає структуру і властивості вуглецевих сталей, є вуглець. Вуглець сильно впливає на властивості сталі навіть при незначній зміні його вмісту. Це пояснюється тим, що структура вуглецевої сталі

після повільного охолодження складається з двох фаз – фериту і цементиту. Вони мають різні властивості залежно від співвідношення цих фаз. Ферит має низьку міцність, низьку твердість і хорошу пластичність, а цементит є дуже твердою і має крихку фазу. Частка фериту зі збільшенням концентрації вуглецю в сталі поступово зменшується, а частка цементиту збільшується. Тому зі збільшенням кількості вуглецю підвищується твердість і міцність самої сталі (умовна межа текучості, межа міцності на розрив), а знижуються характеристики пластичності, подовження, звуження.

Точна оцінка вмісту вуглецю в сталі є першим і найважливішим параметром ідентифікації, який є основою запропонованої методології автоматичного вибору матеріалу (1-й зелений блок). Цей параметр ідентичності слід застосовувати, коли відхилення хімічного складу вуглецю становить 10% і більше, що узгоджується з [390].

Крім основних компонентів (заліза і вуглецю), в вуглецевої сталі є домішки Mn, Si, S, P і ін. Mn і Si в десятих частках відсотка переходять в сталь в процесі її розкислення; S і P в сотих частках відсотка залишаються в сталі через труднощі їх повного видалення; Cr і Ni перетворюються на сталь із шихти, що містить легований металобрухт, і допускаються в кількостях трохи більше 0,3% кожен. Відповідні стандарти регламентують допустиму кількість домішок у сталі. Домішки також впливають на механічні та технологічні властивості сталі. Наприклад, Mn і Si підвищують твердість і міцність, P надає холодноламкість сталі (крихкість при нормальних і низьких температурах), а S надає сталі червоноламкість (ламкість при температурах гарячої обробки тиском). Для високоякісних вуглецевих сталей висуваються більш високі вимоги до складу, наприклад, менший вміст сірки (менше 0,04%) і фосфору (менше 0,035%). Таким чином, другим параметром ідентифікації є точна оцінка вмісту зазначених хімічних елементів (1-й зелений блок) [391].

Тому, виходячи з проектних вимог до механічних властивостей необхідного матеріалу та враховуючи дані 1-го блоку, ми застосовуємо критерій подібності для пошуку в базі даних фазового складу матеріалу з певними

властивостями, що забезпечує найкращу відповідність підходу (2-й зелений квартал).

Наприклад, високоякісна феритно-перлітна нелегована середньовуглецева конструкційна сталь AISI 1045 є однією з найпоширеніших завдяки поєднанню ціни та якості. Її фазовий склад становить 0,42–0,50 % C і менше 2,57 % домішок. Однак ця сталь має різні аналоги за своїми властивостями. Зокрема, згідно зі стандартом ASTM A29/29M, сталь 1045 має 0,43–0,50% C; відповідно до стандарту DIN W-Nr, GB/T і BS сталі DIN 1.1191/Ck45, 45 і 080M46 мають 0,42–0,50% C; відповідно до стандарту JIS, сталь S45C має 0,42–0,48% C. Крім того, вміст кремнію різниться для різних стандартів (наприклад, ≤0,040% — для стандартів DIN W-Nr і BS, 0,17–0,37% для стандарту GB /T і 0,15–0,35% для стандарту JIS). Вміст марганцю також змінюється (наприклад, 0,60–0,90% для стандартів ASTM A29/29M і JIS, 0,50–0,80% — для стандартів DIN W-Nr, GB/T і BS і 0,35–0,65% для стандарту ГОСТ 1050-88). Крім того, загальний вміст P і S становить менше 0,09% для стандарту ASTM A29/29M, 0,07% — для DIN W-Nr, GB/T і BS і 0,06% — для JIS. Крім того, ця сталь має багато еквівалентних замін (наприклад, США — від 5135 до 5140RH і від G51350 до H51400; Європейський Союз — від 37Cr4 до 41CrS4; Німеччина — від 1,7034 до 1,7045 і від 37Cr4 до 42Cr4; Франція — від 37Cr4 до 42C4TS ; Іспанія — від 37Cr4 до 42Cr4 і від F.1201 до F.1211; Великобританія — 37Cr4, 41Cr4 і від 530A36 до 530M40; Японія — від SCr435 до SCr440H; Китай — від 35Cr до 45CrH, ML38CrA і ML40Cr; Австралія—5132H і 5140).

Внаслідок такого різного фазового складу фізико-механічні властивості для аналогів сталі AISI 1045 істотно відрізняються. Зокрема, для різних стандартів, зазначених вище, умовна межа текучості $\sigma_{0,2}$ може коливатися від 310 до 495 МПа, межа міцності на розрив σ_B – від 550 до 725 МПа, твердість за Брінеллем HB – від 163 до 197–241 кгс/мм^2. Тому запропонований підхід включає більш комплексну методологію (рис. 1.99).

Підхід прийняття рішення передбачає визначення фазового складу на основі даних з наявних баз даних. Це забезпечує найкращий підхід до

раціонального вибору матеріалу враховуючи різні критерії (наприклад, критерії подібності, середньоквадратичний коефіцієнт тощо).

Нарешті, виконується регресійний аналіз для уточнення фізичних і механічних властивостей, після чого приймається остаточне рішення для підтвердження типу матеріалу.

Він був застосований для дослідження вуглецевої сталі. Для цього розглядалися сталі від AISI 1010 до AISI 1060. Хімічний склад вуглецевих сталей представлений в табл. 1.19.

Таблиця 1.19 – Хімічний склад вуглецевих сталей, %. Адаптовано з [392, 393]

Steel	C		Si		Mn		Cr	Other *
	x_1		x_2		x_3		x_4	x_5
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
AISI 1010	0.07	0.14	0.17	0.37	0.35	0.65	0.15	0.66
AISI 1015	0.12	0.19						
AISI 1020	0.17	0.24						
AISI 1025	0.22	0.30			0.50	0.80	0.25	
AISI 1030	0.27	0.35						
AISI 1035	0.32	0.40						
AISI 1040	0.37	0.45						
AISI 1045	0.42	0.50						
AISI 1050	0.47	0.55						
AISI 1055	0.52	0.60						
AISI 1060	0.57	0.65						
Maximum value of $X^{<j>}$ **	0.65		0.37		0.80		0.25	0.66

Примітка. * Cu (0,25%) + Ni (0,25%) + As (0,08%) + S (0,04%) + P (0,04%). ** де j – порядковий номер фазової складової.

Усереднені значення механічних властивостей після всієї термічної обробки зведені в табл. 1.23.

Ця група сталей була обрана, оскільки очікується високоякісна конструкційна вуглецева сталь різних марок завдяки її низькій вартості та високим характеристикам. Вона має широкий спектр застосувань, тому запропонований автоматизований підхід до вибору конструкційної вуглецевої сталі на основі критеріїв прийняття рішень буде корисним для машинобудування, інтелектуального виробництва та промислового

проектування. Тому для досягнення поставленої мети доцільно спочатку вирішити розглянуту задачу для нелегованої сталі з мінімальними змінами хімічних елементів, що характерно для високоякісної конструкційної вуглецевої сталі.

Таблиця 1.20 – Механічні властивості. Адаптовано з [394, 395]

Steel	Conditional Yield Strength $\sigma_{0.2}$, MPa	Ultimate Tensile Strength, σ_B, MPa	Relative Elongation-at-Break, δ_r, %	Relative Narrowing, ψ, %	Fatigue Limit, σ_{-1}, MPa	Brinell Hardness, HB, kgf/mm^2
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
AISI 1010	260	420	32	69	187	143
AISI 1015	215	420	33	70	176	152
AISI 1020	245	470	29	72	206	161
AISI 1025	300	530	27	68	223	177
AISI 1030	415	585	23	65	255	163
AISI 1035	470	660	19	67	302	189
AISI 1040	485	730	17	62	323	208
AISI 1045	495	725	15	55	331	197
AISI 1050	490	710	15	55	421	200
AISI 1055	540	800	14	48	377	239
AISI 1060	590	920	12	50	373	229
Maximum value of $Y^{<l>}$ *	590	920	33	72	421	239

Примітка. * де l – порядковий номер фізико-механічної властивості.

Ці матеріали широко використовуються в машинобудуванні [396, 397]. Зокрема, сталь AISI 1010 використовується для конструювання втулок, гвинтів, зварювальних елементів трубчастих електронагрівачів і виробів машинобудування, холоднодеформованих труб для котлів і масляних калориферів. З неї виготовляють також корозійностійкі багатошарові листи, елементи гідравлічних систем автомобілів, комбайнів, тракторів, холодильників. Сталь AISI 1015 використовується для конструювання з'єднувальних вузлів металоконструкцій, фасонних частин і втулок. Сталь AISI 1020 використовується для виготовлення муфт, передач, елементів черв'ячних пар. Також з неї виготовляють всілякі пристосування для затиску деталей і з'єднувальні елементи між ланками механізмів (наприклад, кронштейни, вали).

Осі, вали, муфти, важелі, вилки, вали, болти, фланці, кріплення виготовляються зі сталі AISI 2025. Сталь AISI 2030 широко використовується в

авіабудуванні, машинобудуванні, суднобудуванні та інших цивільних і військових галузях. Зі сталі AISI 1035 виготовляють елементи арматури на атомних електростанціях, кріплення на трубопроводах, котлах теплових електростанцій. Сталь AISI 1040 використовується для виготовлення високоміцних деталей, наприклад, труб, дисків, валів, роторів турбомашин. Колінчасті вали, циліндри, шпинделі та шестерні виготовлені зі сталі AISI 1045.

Сталь AISI 1050 застосовується при конструюванні деталей, що працюють в умовах тертя і високих навантажень (наприклад, шестерні, муфти, коробки передач, тяги, осі, вали, пружини). Сталь AISI 1055 широко використовується в автомобільній промисловості для виготовлення ресор, залізничного транспорту та ін. машинобудівних галузей. Сталь AISI 1060 використовується для виготовлення коліс, шпинделів, муфт та інших деталей з високою міцністю та зносостійкістю.

2. Пряма задача

Пряма задача полягає в оцінюванні впливу фазового складу матеріалу на його фізико-механічні властивості на основі наступного матричного рівняння:

$$[X][A] = [Y], \tag{1.54}$$

де [X] – матриця фазового складу; [Y] – матриця механічних властивостей; [A] – матриця зважених факторів.

Матриця [X] – прямокутна розмірністю m × n, де m – загальна кількість розглянутих матеріалів; n – загальна кількість відповідних компонентів фази. Усі елементи $X_{i,j}$ враховуються за наявними базами конструкційних матеріалів (i – порядковий номер матеріалу – i = 1, 2, . . ., m; порядковий номер фазової складової – j = 1, 2, ..., n).

Матриця [Y] також є прямокутною, розміром m × L, де L – загальна кількість цінних фізико-механічних властивостей. Усі елементи $Y_{i,l}$ також враховуються наявними базами конструкційних матеріалів (l – порядковий номер фізико-механічної властивості, l = 1, 2, . . ., L).

Отже, матриця [A] є прямокутною з розміром n × L. Елементи Ai,j слід оцінювати за даними матриць фазового складу [X] та відповідних фізико-механічних властивостей [Y]. Однак цю проблему неможливо вирішити безпосередньо, оскільки всі значення Xi,j змінюються в певному діапазоні між їх мінімальним значенням $X(min)_{i,j}$ і максимальним значенням $X(max)_{i,j}$.

Для вирішення цієї проблеми використовуються кілька груп експериментів із застосуванням випадкового моделювання. Тому матричне рівняння (1) необхідно перетворити до узагальненого вигляду:

$$[\overline{X}][A] = [\overline{Y}], \tag{1.55}$$

де матриця [A] залишається незмінною; [X] – розширена матриця фазових складів. Його рівномірно розподілені значення нормуються таким чином:

$$(\overline{X}_{i,j})_k = \frac{X_{i,j}^{min} + rnd\left(X_{i,j}^{max} - X_{i,j}^{min}\right)}{max\left(X^{\langle j \rangle}\right)}, \tag{1.56}$$

де k – порядковий номер числового експерименту; rnd(X) — рівномірно розподілене випадкове число від 0 до X.

Матриця [Y] розширена аналогічними матрицями [Y] в k разів з попередньою нормалізацією. Його елементи наступні:

$$(\overline{Y}_{i,l})_k = \frac{Y_{i,l}}{max\left(Y^{\langle l \rangle}\right)}. \tag{1.57}$$

Загалом, перший множник ліворуч від цього рівняння будується шляхом укладання всіх випадково згенерованих матриць $[X]_k$ у межах кожного k-го числового експерименту. Права частина цього рівняння також складається

шляхом укладання всіх випадково згенерованих матриць $[Y]_k$ у кожному k-му числовому експерименті:

$$\overline{[X]} = \begin{bmatrix} [X]_1 \\ [X]_2 \\ \dots \\ [X]_N \end{bmatrix}; \ \overline{[Y]} = \begin{bmatrix} [Y]_1 \\ [Y]_2 \\ \dots \\ [Y]_N \end{bmatrix}, \tag{1.58}$$

де N – загальна кількість чисельних експериментів (k = 1, 2, . . ., N).

Слід зазначити, що всі елементи $(Xi,j)_k$ і $(Yi,l)_k$ змінюються в діапазоні від 0 до 1. Розміри матриць [X] і [Y] становлять (k·m) × n і (k·m) × L відповідно.

За умови N >> n рівняння (2) можна розв’язати відносно матриці [A] за допомогою наступної формули лінійної регресії:

$$[A] = \left(\overline{[X]}^T \overline{[X]} \right)^{-1} \overline{[X]}^T \overline{[Y]}. \tag{1.59}$$

Нарешті, невідому матрицю $[Y^{(e)}]$ механічних властивостей можна оцінити за рівнянням (1.54):

$$\left[Y^{(e)} \right] = \left[X^{(av)} \right] [A], \tag{1.60}$$

де $[X^{(av)}]$ – усереднена матриця фазового складу, елементи якої визначаються наступним чином:

$$X_{i,j}^{(av)} = \frac{X_{i,j}^{min} + X_{i,j}^{max}}{2}. \tag{1.61}$$

Тому пряма задача базується на комплексному використанні імовірнісного та регресійного підходів. При цьому чим більше загальна кількість N чисельних експериментів, тим точніше визначаються значення оцінюваних параметрів.

Програмування формул (1.54)–(1.62) для нормалізованих параметрів можна реалізувати за допомогою системи комп’ютерної алгебри (рис. 1.100).

$$x(i,j,k) := x_{min_{i,j}} + rnd\left(x_{max_{i,j}} - x_{min_{i,j}}\right)$$

```
X := | for i ∈ 1..m
     |   for j ∈ 1..n
     |     X_{i,j} ← x(i,j,k)
     | for k ∈ 2..N
     |   | for i ∈ 1..m
     |   |   for j ∈ 1..n
     |   |     ΔX_{i,j} ← x(i,j,k)
     |   | X ← stack(X, ΔX)
     | X

Y_r := | for i ∈ 1..m
       |   Y_i ← y_{i,r}
       | for k ∈ 2..N
       |   | for i ∈ 1..m
       |   |   ΔY_i ← y_{i,r}
       |   | Y ← stack(Y, ΔY)
       | Y
```

$$A_r := \left(X^T \cdot X\right)^{-1} \cdot X^T \cdot Y_r$$

```
X_av := | for i ∈ 1..m
        |   for j ∈ 1..n
        |     X_av_{i,j} ← (x_min_{i,j} + x_max_{i,j}) / 2
        | X_av
```

$$Y_e := X_{av} \cdot A_r$$

Рисунок 1.100 – Реалізація програми з використанням системи комп’ютерної алгебри MathCAD

3. Зворотна задача

Зворотна задача більш цінна для практичних цілей. Ця проблема не може розв’язувати безпосередньо з прямого, оскільки кожен елемент матриці [X] змінюється в певному діапазоні. Тому пропонується наступна модифікація. Розглянемо стовпець-вектор L фізико-механічних властивостей для довільного невідомого матеріалу:

$$\{Y_0\} = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_L \end{Bmatrix}. \tag{1.62}$$

Цей матеріал має бути з однієї групи матеріалів, але з різними фізико-механічними властивостями. Згідно з цим припущенням, залежність між цими властивостями та концентраціями невідомих фаз залишається незмінною:

$$[A]^T \left\{ X^{(e)} \right\} = \{Y_0\}, \tag{1.63}$$

де $\{X_0\}$ — вектор-стовпець n невідомих компонент фази:

$$\{X_0\} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_L \end{Bmatrix}. \tag{1.64}$$

Якщо загальна кількість L невідомих фазових елементів не менша за загальну кількість n виміряних фізико-механічних властивостей для довільного матеріалу, рівняння (10) також можна розв’язати на основі такої формули регресії:

$$\left\{ X^{(e)} \right\} = \left([A][A]^T \right)^{-1} [A]\{Y_0\}. \tag{1.65}$$

4. Точність оцінювання

Точність оцінки можна оцінити наступним чином. Зокрема, можна обчислити максимальну відносну похибку прямої задачі:

$$\delta_{dir}^{max} = max \left| \frac{Y_{i,l}^{(e)}}{Y_{i,l}} - 1 \right| \cdot 100\%. \tag{1.66}$$

Чим менше максимальна відносна похибка δmax_{dir}, тим вища точність оцінювання для прямої задачі.

Наступний нормалізований критерій подібності може підтвердити надійність запропонованого підходу для розв'язування зворотної задачі в термінах різних компонент l-ї фази:

$$s_i^{(l)} = \frac{\left(\frac{X_{i,l}^{(av)}}{X_l^{(e)} - X_{i,l}^{(av)}}\right)^2}{\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{X_{i,l}^{(av)}}{X_l^{(e)} - X_{i,l}^{(av)}}\right)^2}. \quad (1.67)$$

Чим вищий критерій подібності $s(l)_i$, тим вища точність оцінки i-го матеріалу за l-ю компонентою фази.

Крім того, загальний нормалізований критерій подібності за всіма елементами фазового складу може бути:

$$\bar{s}_i = \frac{S_i - min(S)}{\sum_{i=1}^{m}[S_i - min(S)]}, \quad (1.68)$$

де S_i – наступне ненормалізоване значення:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n}\left(\frac{X_{i,j}^{(av)}}{X_j^{(e)} - X_{i,j}^{(av)}}\right)^2. \quad (1.69)$$

Чим вище загальний критерій подібності S_i, тим вища точність оцінювання i-го матеріалу за всім фазовим складом.

Крім того, точність оцінки також можна традиційно визначити за допомогою середнього квадратичного значення:

$$RS_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\left(X_j^{(e)} - X_{i,j}^{(av)}\right)^2}{n}}. \tag{1.70}$$

$$\delta_e = max\left|\frac{(Y_0)_l}{([Y]^T)_{l,i}} - 1\right| \cdot 100\%. \tag{1.71}$$

Результати

1. Регресійні залежності

Згідно з даними, наведеними в табл. 1.22 та 1.23, використано такі параметри: загальна кількість розглянутих матеріалів – m = 11; загальна кількість фаз – n = 5; загальна кількість оцінених механічних властивостей – L = 6.

Нормовані матриці мінімальних і максимальних значень для фазового складу з (3) виглядають наступним чином:

$$\left[X^{min}\right] = \begin{bmatrix} 0.108 & 0.459 & 0.437 & 0.600 & 1.000 \\ 0.185 & 0.459 & 0.437 & 1.000 & 1.000 \\ 0.262 & 0.459 & 0.437 & 1.000 & 1.000 \\ 0.338 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.415 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.492 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.569 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.646 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.723 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.800 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.877 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix}; \left[X^{max}\right] = \begin{bmatrix} 0.215 & 1.000 & 0.813 & 0.600 & 1.000 \\ 0.292 & 1.000 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.369 & 1.000 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.462 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.538 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.615 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.692 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.769 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.846 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.923 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix} \tag{1.72}$$

Нормовані матриці фізико-механічних властивостей з (1.58) є такими:

$$[Y]_k = \begin{bmatrix} 0.441 & 0.457 & 0.970 & 0.958 & 0.444 & 0.598 \\ 0.346 & 0.457 & 1.000 & 0.972 & 0.418 & 0.636 \\ 0.415 & 0.511 & 0.879 & 1.000 & 0.489 & 0.674 \\ 0.508 & 0.576 & 0.818 & 0.944 & 0.530 & 0.741 \\ 0.703 & 0.636 & 0.697 & 0.903 & 0.606 & 0.682 \\ 0.797 & 0.717 & 0.576 & 0.931 & 0.717 & 0.791 \\ 0.822 & 0.793 & 0.515 & 0.861 & 0.767 & 0.870 \\ 0.839 & 0.788 & 0.455 & 0.764 & 0.768 & 0.828 \\ 0.831 & 0.772 & 0.455 & 0.764 & 1.000 & 0.837 \\ 0.915 & 0.870 & 0.424 & 0.667 & 0.895 & 1.000 \\ 1.000 & 1.000 & 0.364 & 0.694 & 0.886 & 0.958 \end{bmatrix} \quad (1.73)$$

Після проведення N = 1 × 10^4 числових експериментів були отримані наступні випадково згенеровані матриці (5):

$$[\overline{X}] = \begin{bmatrix} 0.108 & 0.564 & 0.657 & 0.600 & 1.000 \\ 0.203 & 0.844 & 0.551 & 1.000 & 1.000 \\ 0.368 & 0.524 & 0.441 & 1.000 & 1.000 \\ 0.359 & 0.703 & 0.646 & 1.000 & 1.000 \\ 0.523 & 0.976 & 0.827 & 1.000 & 1.000 \\ 0.588 & 0.998 & 0.854 & 1.000 & 1.000 \\ 0.615 & 0.826 & 0.628 & 1.000 & 1.000 \\ 0.749 & 0.722 & 0.904 & 1.000 & 1.000 \\ 0.797 & 0.857 & 0.840 & 1.000 & 1.000 \\ 0.864 & 0.866 & 0.688 & 1.000 & 1.000 \\ 0.895 & 0.536 & 0.885 & 1.000 & 1.000 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.929 & 0.998 & 0.972 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix}; [\overline{Y}] = \begin{bmatrix} 0.441 & 0.457 & 0.970 & 0.958 & 0.444 & 0.598 \\ 0.346 & 0.457 & 1.000 & 0.972 & 0.418 & 0.636 \\ 0.415 & 0.511 & 0.879 & 1.000 & 0.489 & 0.674 \\ 0.508 & 0.576 & 0.818 & 0.944 & 0.530 & 0.741 \\ 0.703 & 0.636 & 0.697 & 0.903 & 0.606 & 0.682 \\ 0.797 & 0.717 & 0.576 & 0.931 & 0.717 & 0.791 \\ 0.822 & 0.793 & 0.515 & 0.861 & 0.767 & 0.870 \\ 0.839 & 0.788 & 0.455 & 0.764 & 0.768 & 0.828 \\ 0.831 & 0.772 & 0.455 & 0.764 & 1.000 & 0.837 \\ 0.915 & 0.870 & 0.424 & 0.667 & 0.895 & 1.000 \\ 1.000 & 1.000 & 0.364 & 0.694 & 0.886 & 0.958 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1.000 & 1.000 & 0.364 & 0.694 & 0.886 & 0.958 \end{bmatrix} \quad (1.74)$$

За формулою лінійної регресії (6) оцінено матрицю зважених факторів:

$$[A] = \begin{bmatrix} 0.823 & 0.668 & -0.850 & -0.478 & 0.751 & 0.470 \\ -0.006 & 0.000 & 0.004 & 0.003 & -0.011 & 0.000 \\ 0.147 & 0.040 & -0.113 & 0.027 & 0.040 & -0.002 \\ -0.238 & -0.090 & 0.072 & 0.229 & -0.154 & 0.008 \\ 0.362 & 0.376 & 1.133 & 0.880 & 0.397 & 0.518 \end{bmatrix}. \quad (1.75)$$

Отже, після використання нормованої усередненої матриці (1.62) фазового складу

$$\left[X^{(av)}\right] = \begin{bmatrix} 0.162 & 0.730 & 0.625 & 0.600 & 1.000 \\ 0.238 & 0.730 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.315 & 0.730 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.400 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.477 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.554 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.631 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.708 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.785 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.862 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.938 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix}, \qquad (1.76)$$

Невідому нормалізовану матрицю механічних властивостей можна оцінити за рівнянням (1.61):

$$\left[Y^{(e)}\right] = \begin{bmatrix} 0.439 & 0.457 & 0.970 & 0.958 & 0.444 & 0.598 \\ 0.407 & 0.457 & 1.000 & 0.972 & 0.418 & 0.636 \\ 0.415 & 0.511 & 0.879 & 1.000 & 0.489 & 0.674 \\ 0.508 & 0.576 & 0.818 & 0.944 & 0.530 & 0.741 \\ 0.703 & 0.636 & 0.697 & 0.903 & 0.606 & 0.682 \\ 0.797 & 0.717 & 0.576 & 0.931 & 0.717 & 0.791 \\ 0.822 & 0.793 & 0.515 & 0.861 & 0.767 & 0.870 \\ 0.839 & 0.788 & 0.455 & 0.764 & 0.768 & 0.828 \\ 0.831 & 0.772 & 0.455 & 0.764 & 1.000 & 0.837 \\ 0.915 & 0.870 & 0.424 & 0.667 & 0.895 & 1.000 \\ 1.000 & 1.000 & 0.364 & 0.694 & 0.886 & 0.958 \end{bmatrix}. \qquad (1.77)$$

Кожен елемент $Y(e)_{i,l}$ матриці (1.68) дуже близький до відповідного елемента $Y_{i,l}$ матриці (1.68).

Використовуючи формулу (1.57), можна зробити висновок, що 68% отриманих даних мають максимальну відносну похибку менше 6%, і лише 12% отриманих даних перевищують максимальну похибку 10% (але тільки не більше 14%).

2. Раціональний вибір матеріалу

Для підтвердження достовірності оберненої задачі розглядається довільно невідомий матеріал з наступними механічними властивостями: умовна межа текучості $\sigma_{0,2}$ = 517 МПа, межа міцності на розрив σ_B = 740 МПа, відносне

подовження при розриві δ_r = 16%, відносна стрілка ψ = 56 %, межа втоми σ_{-1} = 340 МПа, твердість за Брінеллем НВ = 200 кгс/мм^2.

Усі ці дані не повністю вписуються у всі рядки табл. 1.23. Тому необхідно вирішити пряму задачу оцінки фазового складу.

По-перше, можна розрахувати нормалізовані фізико-механічні властивості (9): y_1 = 0,876, y_2 = 0,804, y_3 = 0,485, y_4 = 0,778, y_5 = 0,808 і y_6 = 0,837.

По-друге, відповідно до формули лінійної регресії (10) нормалізовані компоненти фази такі: x_1 = 0,687, x_2 = 0,756, x_3 = 0,829, x_4 = 0,989 і x_5 = 0,960. тому розрахунковий матеріал має наступний фазовий склад: 0,45% C, 0,28% Si, 0,66% Mn, 0,25% Cr, 0,63% інші компоненти (Cu, Ni, As, S, P).

Наступні критерії були оцінені для прийняття рішення про те, яка сталь найбільш підходить для такого фазового композиту. Зокрема, були розраховані нормовані критерії подібності (14) для C і Mn. Їхні максимальні значення 0,90 і 0,11 відповідно досягаються для i = 8. Крім того, загальний нормалізований критерій подібності (15) досяг максимального значення 0,55 для i = 8. Крім того, середнє квадратичне (17) також досягає свого мінімуму 0,16 при i = 8. Наведені вище результати аналізу прийняття рішень представлені графічно на рис. 1.101.

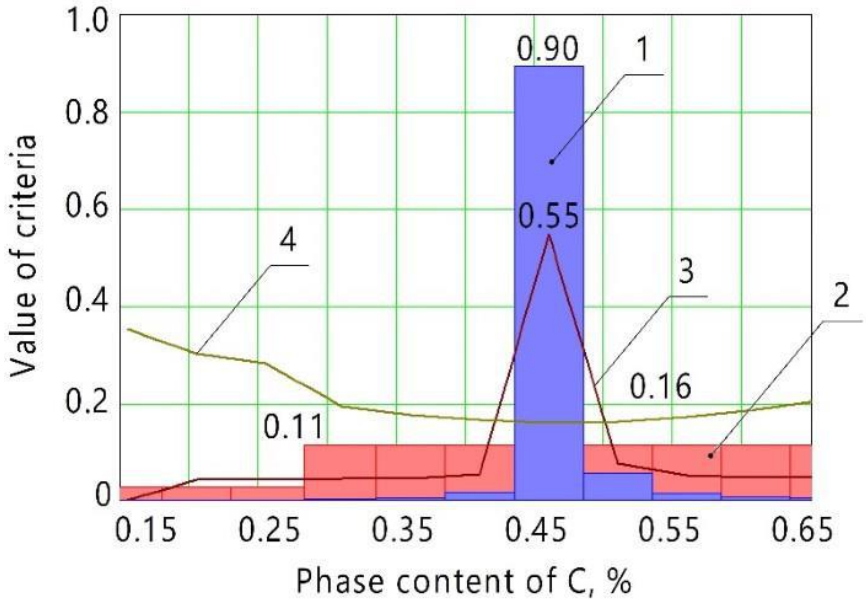


Рисунок 1.101 – Графічне представлення підходу до прийняття рішень щодо вибору матеріалу: 1 – нормалізовані критерії подібності для C; 2 – нормовані критерії подібності для Mn; 3 – загальний нормалізований критерій подібності; 4 – середнє квадратичне

Тому умовно невідомим матеріалом є сталь AISI 1045 (табл. 1.21).

Точність тесту за фазовим складом, оцінена запропонованим підходом, представлена в табл. 1.21.

Таблиця 1.21 – Точність випробування сталі AISI 1045

Phase Content	C	Si	Mn	Other *
Evaluated	0.45	0.28	0.66	0.63
Averaged by AISI [27,28]	0.46	0.27	0.65	0.66
Relative error, %	2.2	3.7	1.5	4.5

* Cu, Ni, As, S, and P.

Зокрема, для сталі AISI 1045 максимальна відносна похибка не перевищує 5%.

Обговорення

Після детального аналізу цієї матриці можна сформулювати наступні твердження.

Значення $A_{1,1}$ = 0,823, $A_{1,2}$ = 0,668 і $A_{1,5}$ = 0,751 вказують на те, що збільшення вмісту вуглецю суттєво впливає на збільшення умовної межі текучості σ0,2, межі міцності на розтяг

міцність σ_B, а межа втоми σ_{-1}. Крім того, $A_{1,3}$ = –0,850 вказує на те, що збільшення вмісту вуглецю значно впливає на зменшення відносного подовження при розриві δ_r. Ці факти відповідають результатам досліджень [398, 399].

Незначні значення $A_{2,l}$ свідчать про те, що збільшення вмісту кремнію не визначає фізико-механічні властивості вуглецевих сталей. Крім того, відносно невеликий значення $A_{3,6}$ вказує на те, що підвищений вміст марганцю не впливає на твердість HB за Брінеллем вуглецевих сталей. Ці факти відповідають результатам досліджень [400, 401].

Крім того, значення $A_{5,3}$ = 1,133, $A_{5,4}$ = 0,880 і $A_{5,6}$ = 0,518 вказують на те, що збільшення вмісту інших добавок (тобто Cu, Ni, As, S і P) може впливати на відносне подовження при -розрив δ_r, відносне звуження ψ і твердість за Брінеллем HB. Цей факт відповідає результатам дослідження [402, 403].

Всі ці факти якісно підтверджують надійність розробленого підходу.

Слід виділити наступні дані, щоб порівняти точність тесту між запропонованим підходом та іншими методами вибору матеріалу. Зокрема, відносні похибки при використанні нейронних мереж [404] і зважених імовірнісних нейронних мереж [405] становлять до 20%, традиційного алгоритму машинного навчання [406] – 12%, алгоритму ймовірнісної нейронної мережі з підтримкою векторної машини [407] – 8 %, а згорткові нейронні мережі [408] – 5%.

Отже, максимальна відносна похибка до 5% кількісно підтверджує надійність запропонованого підходу до вибору матеріалу.

Таким чином, запропонована методологія дозволяє розробити автоматизовану безлюдну базу даних відповідно до стратегії Industry 4.0 з подальшим накопиченням даних у міру їх аналізу. Такий підхід також дозволяє реалізувати віддалений доступ до баз даних матеріалів, що особливо важливо при автоматизації сучасного проектування та технологічної підготовки виробництва. Загалом, усі ці підходи сприяють цифровізації автоматизованого виробництва, особливо у виробництві критичних частин машин.

Подальші напрямки досліджень включатимуть впровадження штучних нейронних мереж для розширення запропонованої методології для різних матеріалів (легованих сталей, композитів тощо) та впровадження відповідної бази даних у програмне забезпечення. Зокрема, планується використовувати імовірнісні нейронні мережі та нейронні мережі загальної регресії.

1.4 Висновок

Підвищення якості вторинних силумінів АК5М2 до рівня первинних є можливим за рахунок використання модифікатора-лігатури із Ti-Zr. Термічна обробка дослідних матеріалів призводить до підвищення міцності при розриві в 1,3-1,5 рази.

Запропонований підхід до проектування виробничих процесів, що заснований на наданні надійного закріплення заготовки та застосуванні сучасних

верстатів із функціями автоматичного визначення координат оброблюваної заготовки, показав свою ефективність. Перевірка працездатності доведена шляхом чисельного моделювання статичних та динамічних характеристик запропонованого ВП та порівнянням їх з допустимими значеннями.

За результатами чисельного моделювання напружено-деформованого стану запропонованої конструкції гнучкого ВП для нерознімних шатунів встановлено, що значення параметрів точності, що задана конструктором при механічному обробленні будуть забезпечені. Адже максимальні переміщення елементів ВП при обробленні нерознімного шатуна склали 0,092 мм, що не перевищують допусків згідно з вимогами креслення. Також дані переміщення є пружними, так як значення максимальних напружень на найбільш навантаженому переході не перевищують межі міцності матеріалу деталей ВП та матеріалу заготовки. Отже, розроблена конструкція ВП відповідає умовам міцності. При цьому коефіцієнт запасу міцності для даної системи при максимальних напруженнях 419 МПа складає 1,8. Із результатів порівняння ВП із повним та неповним базуванням встановлено, що у ВП із неповним базуванням переміщення та напруження менші, що пояснюється меншою кількістю деталей та з’єднань у ВП. Результати гармонічного аналізу запропонованої конструкції свідчать про високу жорсткість розробленого технічного рішення і не допущення появи резонансу через конструктивні недоліки ВП, адже перша резонансна частота ВП у 17 разів перевищує відповідне значення максимальної частоти процесу різання на відповідному переході. Аналіз динамічного стану елементів системи «ВП – заготовка» запропонованого ВП показав, що амплітуди коливань, які виникають під час зняття припуску у процесі різання у місцях оброблюваних поверхонь не перевищують допусків на оброблення на відповідних переходах. Максимальне значення величини амплітуди коливань для переходу розсвердлювання отвору діаметром 29,5 мм у великій бобишці шатуна складає 0.096 мм. Модальний та гармонічний аналіз також підтверджують більш високі показники запропонованої конструкції. Розраховані значення динамічних жорсткостей на кожному з переходів дозволили визначити мінімальну динамічну жорсткість запропонованого ВП, що склала $0{,}61 \times 10^5$ Н/мм. Це значення є досить

високим показником для ВП, що спроектовано за принципом неповного базування заготовок.

В роботі запропонована узагальнена модель вибору лезвійного різального інструменту для забезпечення оптимальних умов різання є одним з шляхів вирішення питання застосування інтернету речей для взаємозв'язку між кіберфізичною системою, замовником та «розумним» виробництвом та дозволяє впровадити принцип віртуалізація виробничих процесів.

Показано, що обробка інструментального твердого сплаву імпульсами магнітного поля зменшує неоднорідність і рівень залишкових напружень, усуває структурні дефекти. Ці факти позитивно впливають на подальше обслуговування інструменту. Зменшення коефіцієнта варіації мікротвердості (з 0,13 до 0,06) і стабільності (з 0,48 до 0,27) є суттєвими факторами для оптимального вибору методу МРТ. Цей ефект свідчить про підвищення стабільності фізико-механічних властивостей твердих сплавів. Відмінною особливістю ріжучого інструменту, оснащеного пластинами зі сплавів ВК8 і Т5К10, є висока стійкість відносно необробленого ВК8 вище на 183%, а Т5К10 — більше ніж на 200%.

Запропоновано спосіб отримання зміцненого поверхневого шару легованих сталей на основі застосування методу азотування в контейнері з використанням нанокристалічного порошку. Відмінною рисою цього методу є необхідність тривалого витримування в печі виробів, що не призводить до роз'єднання матриці сталей. Ця особливість методу спрощує процес, що значно скорочує енерговитрати. Цей факт стає можливим завдяки використанню в запропонованому методі нанодисперсного порошку як насичувального середовища. Підтвердженням цього є дослідження мікроструктури дифузійного шару, яке показало, що отриманий азотований шар подібний до шарів, отриманих при інших видах азотування. Запропонований спосіб борування може бути реалізований для зміцнення виробів та інструментів складної форми, особливо якщо вони після зміцнювальної обробки не піддаються термічній обробці, оскільки корозія та деформація при цих способах мінімальні. Для цього необхідно використовувати нанодисперсний боровмісний порошок, який забезпечує поверхневу твердість легованих сталей о f до 21–23 ГПа. Завдяки

нанодисперсному порошку процес борування прискорюється в 2-3 рази в порівнянні з існуючими технологіями. У цілому ця характеристика зміцнення дозволяє підвищити зносостійкість сталей на 180–340 %.

В роботі наведені результати досліджень покриттів нового покоління на інструментальній сталі У8А. Максимальна мікротвердість була виявлена для шарів TiC – 30,3–35,5 ГПа, шарів TiN – 22,0–22,6 ГПа. Максимальна мікротвердість шару $Fe_2(Ti,Al)_4O$ була виявлена для азототитаноалітованого покриття – 14,0 ГПа, що зумовлено присутністю азоту. Отримані покриття сприяють зростанню жаростійкості сталі У8А при температурі 900 ^{0}C в 4,2–8,5 разів, та зносостійкості в умовах тертя ковзання без змащування до 5,4 разів.

На основі дослідження шляхів сучасного розвитку коллаборативних систем у машинобудуванні: 1) обґрунтовано доцільність впровадження комірок колаборативного складання для підвищення ефективності процесу складання в умовах багатономенклатурного виробництва; 2) запропоновано конструктивне рішення комбайну для складання шатунно-поршневої групи, що покращує процес складання виробу в умовах багатономенклатурного виробництва на 34% порівняно з ручним складанням; 3) запропоновано та розроблено нову конструкцію захватного пристрою для колаборативного робота, яка скорочує витрати часу на підготовку виробництва, підвищує ступінь гнучкості та компенсує похибки, пов’язані з технологічним процесом отримання заготовок.

Встановлено можливості використання однієї з частин концепції Індустрії 4.0. Більш конкретно, він зосереджений на створенні віртуального інструменту навчання конкретним крокам, з якими працівник може зіткнутися під час роботи з виробничим обладнанням. У ньому хронологічно описані окремі етапи створення моделі, їх інтеграція в окреме програмне забезпечення аж до остаточного налаштування серверної частини. Потім представити частину результатів у вигляді перевірки відображення віртуальної моделі в полі зору користувача. Наступні кроки в даний час є предметом дослідження, яке обіцяє можливість використання та оптимізації цих кроків у різних областях.

Порівняно результати, отримані під час розточування звичайною розточувальною штангою та унікальною розточувальною штангою, яка

забезпечує однакову лінійну швидкість ріжучих лез на різних кроках. У першому випадку швидкості різання на фрезах відрізняються в 2 рази, а рекомендована швидкість різання встановлюється на другій фрезі, яка знаходиться найдальше від шпиндельної бабки. Східчасті отвори з однаковою довжиною кроку були машинами. Це забезпечило середні значення коефіцієнтів впливу, що визначають передачу збурень між різцями під час їх спільної роботи. Слід зазначити, що порівняння результатів характеризується незначними змінами амплітуд коливань. Показники зносу ріжучих дисків при переході від розточування суцільною розточувальною штангою до розточування унікальною розточувальною штангою на другому різці практично однакові і знаходяться в межах 7–8 мкм/10^3. Менше значення зносу відповідає звичайній розточувальній штанзі. Величина зносу на першій фрезі (сходинка з великим діаметром) для таких розточувальних штанг різна: відносний знос становить 13–18 мкм/10^3 для звичайної розточної оправки і 8–9 мкм/10^3 для унікальної розточувальної штанги, похибка вимірювання зносу 0,5 мкм. Стаття присвячена можливості тонкого розточування ступінчастих отворів із великою різницею діаметрів кроків унікальними розточувальними стержнями, що забезпечують однакове рекомендоване різання.

Експериментально встановлено співвідношення між компонентами амплітуд коливань: A_z = (l,l-1,6)A_y, A_{tor} = (0,2-0,5)A_y, причому A_z/A_y мало змінюється, а A_{tors}/A_y помітно зменшується зі збільшенням діаметра бурової штанги. Результати розрахунків показують, що зі зменшенням діаметра розточувальної штанги коефіцієнти зв’язку згинальних переміщень з процесом різання (γ) стають значно меншими за свої граничні значення, а коефіцієнти зв’язку кутових переміщень (β_2) зростають, досягаючи своїх граничних значень.

Відносні характеристики свідчать про значну перевагу багатоелементних гасителів перед одноелементними. Одноелементні (ДГК) зменшують максимальні амплітуди коливань і знижують граничну жорсткість розточувальної штанги в 3-4 рази, а багатоелементні – в 5-10 разів. Демпфер типу з є найефективнішим серед випробуваних м. Його ефективність при різанні в 3,5 рази вище, ніж у розточувальних штанг, оснащених одноелементним ДГК.

У процесі точіння присутні численні складні явища. У взаємодії з великою кількістю вхідних змінних процесу ці явища мають значний вплив на шорсткість поверхні. Запропоновано емпіричну модель, яка базується на трьох параметрах процесу та чотирьох параметрах геометрії інструменту, які є життєво важливими для процесу чистового точіння, що дозволило:

- 27 прогонів в А-оптимальному плані експерименту, проведених шляхом остаточного точіння з трьома числовими та чотирма категоріальними факторами, дали середню арифметичну шорсткість поверхні в діапазоні від 0,33 мкм до 4,98 мкм. Отримані значення Ra є нижчими за діапазон, характерний для типових процесів точіння Ra = 0,8-6,3 мкм. Мінімальне значення Ra показує, що можна отримати надзвичайно високу якість поверхні та усунути необхідність подальших операцій механічної обробки, що, у свою чергу, зменшує час та витрати на обробку.

- у цьому експерименті шорсткість поверхні покращується зі зменшенням подачі, глибини різання та кута нахилу ріжучої пластини, тоді як швидкість різання, радіус кута, передній кут і кут підходу повинні залишатися на високому рівні. Хоча подача і кутовий радіус мали домінанту впливу на шорсткість поверхні, внеском решти параметрів не можна було знехтувати.

- емпірична модель, запропонована в цьому дослідженні, дозволяє моделювати та оптимізувати процес фінішної токарної обробки шляхом вибору відповідних рівнів семи вхідних змінних. Це дає мінімізовану середню шорсткість поверхні, Ra = 0,238 мкм, у межах вузького 95% довірчого інтервалу, що призводить до невеликих помилок передбачення.

Встановлено, що причинно-наслідковий аналіз виявився найпростішим для розуміння та впровадження методом від RCA. Підходи QFD і FMEA, які використовуються як інструменти якості при проектуванні композитних матеріалів, можуть значно підвищити ефективність розробки, що призводить до систематичного проектування, вибору матеріалів і виробництва. Основна мета LCA полягає в тому, щоб виділити фази життєвого циклу, які мають сильний вплив на навколишнє середовище, і надати інформацію для процесу проектування продукту для покращення екологічних показників. Тільки за

допомогою цього методу можна об’єктивно визначити, які матеріали є екологічно чистими, а які лише здаються.

Представлено робоче місце SMART під назвою SmartTechLab. Ця лабораторія побудована за концепцією Industry 4.0. Робоче місце було розібрано на ключові частини – складання, ідентифікація, оцифрування та контроль якості 3D-друку. Узагальнено сучасні технології, датчики та пристрої SmartTechLab. Усі системи працюють разом, щоб створити експериментальне автоматизоване робоче місце для найсучасніших досліджень і процесу викладання та навчання.

Дослідження попереднього досвіду, узагальнення та систематизація існуючих підходів до дослідження механічних систем дозволили запропонувати розробку нового підходу, який полягає у комплексному аналізі стану рівноваги та коливань відносно фіксованого положення заготовки як елемента механічна система з урахуванням жорсткості ріжучого інструменту. На прикладі чисельних розрахунків підтверджено адекватність запропонованої математичної моделі динамічного аналізу системи «пристрій – заготовка». Визначено, що перша критична частота коливань заготовки в 6,4 рази перевищує робочу частоту процесу різання, а амплітуда вимушених коливань знаходиться в діапазоні допусків на виготовлення відповідної деталі.

На основі послідовної нормалізації та формул лінійної регресії отримано аналітичні залежності для оцінки фазового складу та фізико-механічних властивостей матеріалів. Пропонований автоматизований підхід якісно проаналізовано щодо впливу елементів фазового складу на фізико-механічні властивості. Також було розраховано кількісні критерії для підтвердження надійності запропонованої методології (тобто нормалізовані та загальні критерії подібності, середнє квадратичне значення та відносні похибки). Зокрема, для прикладу вуглецевої сталі (від AISI 1010 до AISI 1060) відносна похибка не перевищує 5%.

2 РОЗРОБЛЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИН ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІБРАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ РОТОРНИХ СИСТЕМ

2.1 Методика обчислень вимушених коливань роторів енергетичних машин з урахуванням сил різної природи

2.1.1 Динаміка ротора турбокомпресора на основі скінчено-елементного аналізу та підходу ідентифікації параметрів

Ротаційні машини належать до найбільшого класу силових машин [409]. В процесі роботи на ротор діють полігармонічні збурення у вигляді сил і моментів інерції неврівноважених мас. Вони викликають вимушені коливання ротора.

У більшості випадків технічний рівень таких машин оцінюють за їх віброакустичними характеристиками, що визначаються вібраційним станом ротора [410]. Тому проблеми динаміки роторів мають важливе практичне значення, а коло цих завдань визначається кількістю конструктивних типів роторних машин, їх особливостями та умовами експлуатації.

Серед роторних машин багатоступінчасті відцентрові насоси та компресори високого тиску характеризуються постійним збільшенням робочих параметрів (наприклад, швидкості, тиску), що призводить до продуктивності одного агрегату.

Тиск у відцентрових машинах пропорційний квадрату частоти обертання ротора. Тому збільшення швидкості обертання виявляється найбільш раціональним способом досягнення високих тисків. В результаті відцентрові машини високого тиску зазвичай високошвидкісні. І для таких машин ротодинамічні задачі є особливо актуальними [411].

Причинами незадовільного вібраційного стану ротора є дисбаланс і розцентровка, силові та температурні деформації корпусу та його окремих елементів, втрата динамічної стійкості, конструктивні та технологічні дефекти, знос зазорових ущільнень, опор, приводних муфт [412, 413].

Підвищені вібрації супроводжуються роботами, близькими до критичних частот. Розрахунок останнього не може гарантувати надійну відстроювання від резонансу через відсутність достовірних даних про жорсткість опор і вплив випадково змінних факторів [414].

Сучасні напрямки дослідження динаміки поворотних систем базуються переважно на комп’ютерних програмах, які реалізують скінчено-елементний аналіз [415].

Для вирішення таких задач використовуються 2D і 3D скінченні елементи [416, 417].

Розрахунок динаміки ротора, наприклад, за допомогою чисельного моделювання за допомогою програмного забезпечення ANSYS, займає багато часу. В основному це пов'язано з часом на підготовку вихідних даних. Це також вимагає багато машинного часу.

Відповідно до зазначених вище, робота спрямована на покращення вібраційного стану роторної системи шляхом створення надійної моделі для оцінки динамічного стану.

Основними завданнями дослідження є:

– розробка уточненої математичної моделі вільних та вимушених коливань ротора з урахуванням заданої залежності жорсткості опор від частоти обертання ротора;

– параметрична ідентифікація коефіцієнтів залежності жорсткості несучих опор;

– моделювання динаміки ротора багатоступінчастого відцентрового компресора 225GC2-135/12-50M1245 за допомогою програми «Критичні частоти ротора», реалізованої в система комп'ютерної алгебри MathCAD;

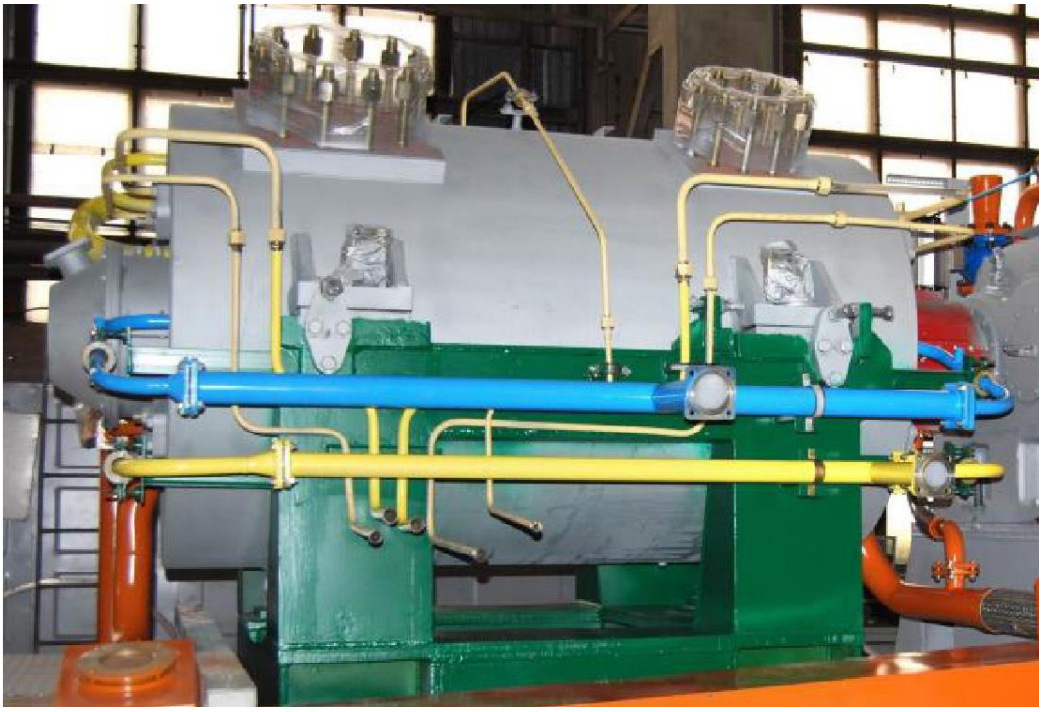
– перевірка надійності скінчено-елементної моделі в програмному забезпеченні ANSYS;

Методи дослідження включають чисельне моделювання вільних коливань ротора з використанням скінчено-елементного аналізу та комплексного підходу ідентифікації параметрів.

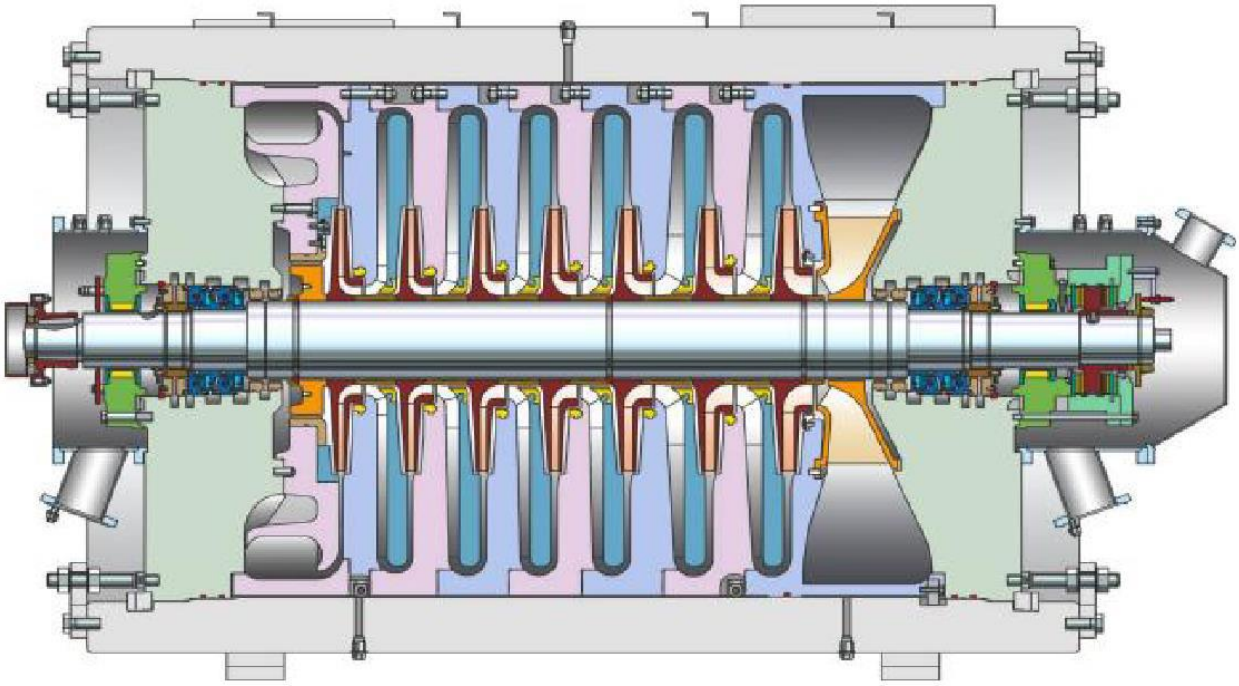
Методологія дослідження

1. Схема проектування

Об’єктом дослідження є вільні коливання гнучкого ротора відцентрового компресора 225GC2-135/12-50M1245 (рис. 2.1). Його технічні параметри наведені в табл. 2.1.



а)



б)

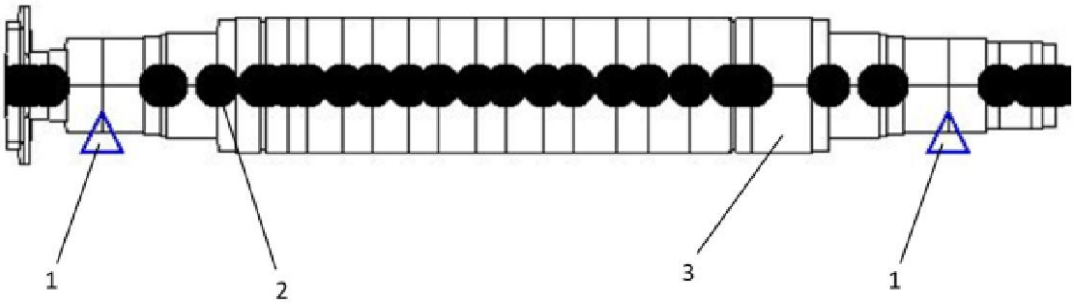
Рисунок 2.1 – Загальний вигляд (а) та розріз (б) турбокомпресора

Таблиця 2.1 – Технічні параметри

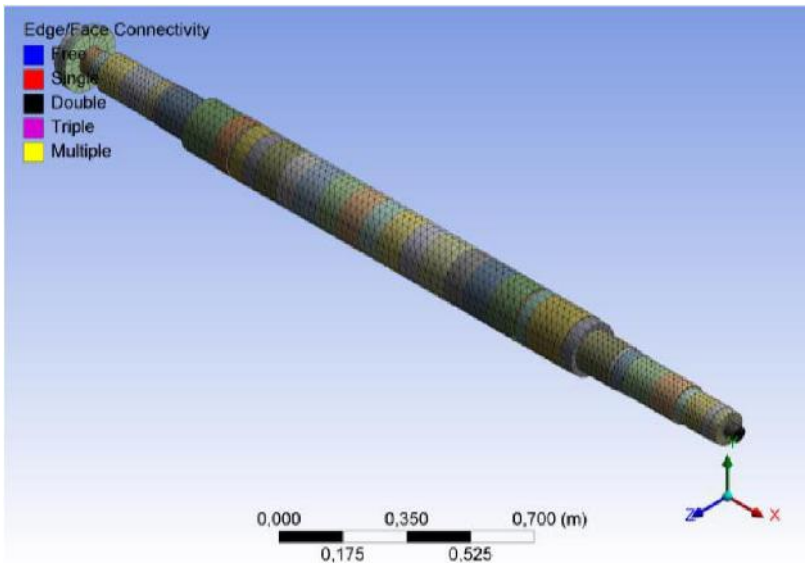
Параметр	Значення
Нормальна продуктивність, $м^3/с$	25,0
Тиск на вході, МПа	1,20
Тиск на виході, МПа	4,95
Політропний ККД, %	70,0
Частота обертання ротора, об/хв	8920
Номінальна потужність, МВт	7,33
Температура газу на вході, °С	28,1

Для подальшого вивчення динаміки ротора необхідно створити його розрахункову модель. Скінчено-елементну модель балки складено за допомогою авторської програми «Критичні частоти ротора» [418] (рис. 2.2а).

На рисунку 2b представлена тривимірна скінчено-елементна модель, створена в програмному забезпеченні ANSYS.



а)



б)

Рисунок 2.2 – Розрахункові моделі в MathCAD (а) та ANSYS (б): 1 – радіальні опори; 2 – локальні маси; 3 – скінченні елементи

2. Опис програми

Програма «Критичні частоти ротора» заснована на методі скінченних елементів. Призначений для оцінки критичних і власних частот радіальних коливань роторів. Результатом розрахунку є значення критичних частот і форми коливань. Програма створена за допомогою системи комп'ютерної алгебри MathCAD.

Потрібними вхідними даними є щільність і модуль Юнга матеріалу, довжини секцій, внутрішній і зовнішній діаметри, додані маси монтажних деталей, а також жорсткість опор підшипників і ущільнень зазорів. Матричні рівняння вільних коливань ротора, що обертається, можна подати у вигляді:

$$\bar{M}\ddot{\bar{U}} + \bar{K}\bar{U} = 0, \tag{2.1}$$

де $\bar{U} = \left(x_1, \quad \vartheta_1, \quad x_2, \quad \vartheta_2, \quad \ldots, \quad x_{n+1}, \quad \vartheta_{n+1}\right)^T$ – стовпець-вектор прогинів і кутів повороту перерізів на стиках скінченних елементів.

Локальні матриці $\bar{K}_i$ та $\bar{M}_i$ розміром 4×4 мають стандартний вигляд згідно з основами коливань балки [419, 420].

Формування глобальних матриць $\bar{K}$ і $\bar{M}$ та локальних матриць $\bar{K}_i$, $\bar{M}_i$ для i = (1, n + 1) базується на алгоритмі, який використовує умови з'єднання для всіх ділянок [421].

Розрахунок критичних частот ротора базується на чисельному визначенні власних значень λ наступного рівняння:

$$det[\bar{K} - \lambda\bar{M}] = 0. \tag{2.2}$$

Програма розрахунку вільних коливань складається з наступних етапів:

1) розрахунок коефіцієнтів для матриць жорсткості та інерційності;

2) розв'язання частотного рівняння (2.2) і знаходження заданої кількості власних частот;

3) розрахунок форм мод вільних коливань, що відповідають їх частотам.

3. Математична модель опорної жорсткості

У даній роботі запропоновано апроксимувати залежність жорсткості опор від частоти обертання ротора наступною аналітичною формулою:

$$c(\omega) = c_0 + (c_{\max} - c_0)(1 - e^{-k\omega}), \tag{2.3}$$

де c_0 – початкова жорсткість, Н/м; $c_{\max}$ – максимальна жорсткість, Н/м; ω – робоча швидкість, рад/с; k – часовий параметр, с.

Така модель має такі переваги порівняно з поліноміальною апроксимацією. По-перше, замість нескінченного збільшення жорсткості вона асимптотично наближається до максимального значення. По-друге, при наближенні до цього значення градієнт жорсткості асимптотично наближається до нуля.

Ці факти пояснюються тим, що параметр k має таке фізичне значення:

$$\frac{dc(\omega)}{d\omega} = k\left[c_{\max} - c(\omega)\right]. \tag{2.4}$$

Відповідно до підходу квазілінійної ідентифікації параметра, невідомий параметр k у виразі (1) можна оцінити методом найменших квадратів:

$$R(k) = \sum_{n=1}^{N}\left[k\omega_n - \ln\left(\frac{c_{\max} - c_0}{c_{\max} - c_n}\right)\right]^2 \longrightarrow \min, \tag{2.5}$$

де n – номер експериментальної точки; N – загальна кількість набору експериментальних даних; ω_n – n-та робоча швидкість, рад/с; c_n – експериментально отримана жорсткість, Н/м.

Остання умова виконується для значень k, при яких наступна похідна дорівнює нульовому значенню:

$$\frac{dR(k)}{dk} = 2\sum_{n=1}^{N}\left[k\omega_n - \ln\left(\frac{c_{\max} - c_0}{c_{\max} - c_n}\right)\right]\omega_n = 0, \tag{2.6}$$

Нарешті, можна отримати наступну регресійну залежність:

$$k = \frac{\sum_{n=1}^{N}\left[\omega_n \ln\left(\frac{c_{\max} - c_0}{c_{\max} - c_n}\right)\right]}{\sum_{n=1}^{N}\omega_n^2} \tag{2.7}$$

Таким чином, визначення невідомого параметра k вимагає попереднього експериментального визначення жорсткостей c_0 і c_{max}.

Результати

1. Моделювання в MathCAD

Розрахунок власних частот передбачає обчислення небезпечних швидкостей під час постійного обертання ротора на його робочій частоті. Для розглянутого прикладу така частота дорівнює 934 рад/с.

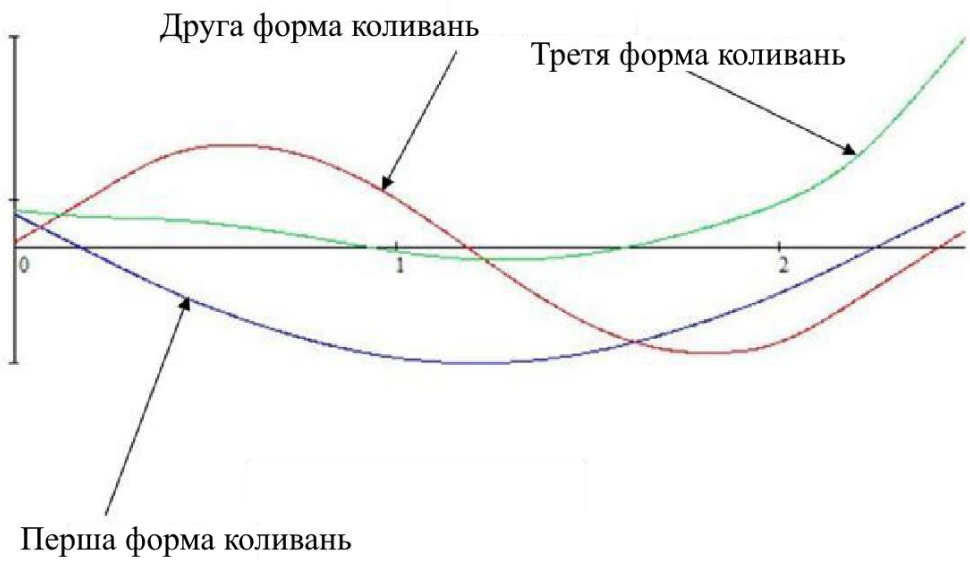
Жорсткість підшипників також приймалася постійною і рівною жорсткості на робочій швидкості (c_p = 2,94·108 Н/м).

Примітно, що критичні частоти небезпечні для ротора під час його розгону до робочого режиму. Для їх розрахунку необхідно враховувати, що підшипники мають різну жорсткість при різних частотах обертання, які залежать від значень власних частот ротора.

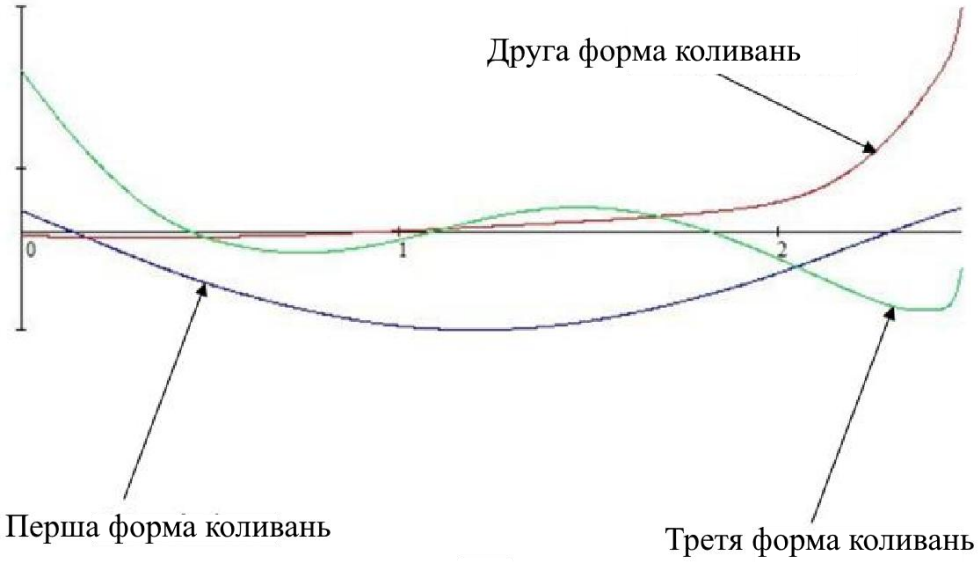
Програма «Критичні частоти ротора» дозволяє безпосередньо задавати залежність жорсткості опор ротора від частоти його обертання.Використовуючи набір даних ВАТ «Сумське НВО» (м. Суми, Україна), були оцінені наступні значення: $c_0 = 1{,}77\cdot10^8$ Н/м і $c_{max} = 1{,}51\cdot10^9$ Н/м.

Отже, згідно з формулою (2.7) оцінюваний параметр часу $k = 1{,}0\cdot10^{-4}$ с.

Програма «Критичні частоти ротора» виводить результат у вигляді значень власної частоти та відповідних їм форм. На рисунку 3 представлено скріншоти з програми з результатами розрахунку для досліджуваного ротора.



а)



б)

Рисунок 2.3 – Власна (а) і критична (б) частоти ротора

2. Моделювання ANSYS

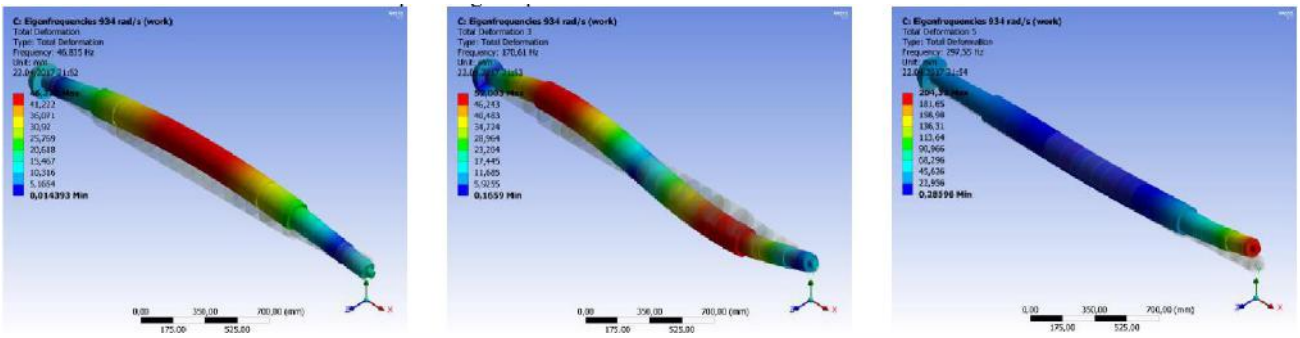
За результатами чисельного моделювання за допомогою програмного забезпечення ANSYS на рис. 2.4 наведено модові форми вільних коливань ротора на відповідних частотах.

На жаль, ANSYS не дозволяє безпосередньо оцінювати критичні частоти, як це можливо в програмі «Критичні частоти ротора».

Загалом розрахунок критичних частот за допомогою програмного забезпечення ANSYS схожий на обчислення власних частот. Єдина відмінність полягає в тому, що необхідно враховувати властивість підшипників нелінійно змінювати свою жорсткість в залежності від частоти обертання. Однак модальний аналіз ігнорує нелінійності вихідної моделі [422].

Під час моделювання розраховували жорсткість підшипників в діапазоні частот обертання від 0 до 3000 рад/с з кроком 250 рад/с.

Потім, змінюючи жорсткість підшипників в ANSYS, у вигляді діаграми Кемпбелла знаходили власні частоти ротора на відповідних частотах його обертання (рис. 2.5).



а) б) в)

Рисунок 2.4 – 1 (а), 2 (б) і 3 (в) форми вільних коливань ротора

Суть методу Кемпбелла для розрахунку критичних частот ротора полягає в тому, що ординати точок перетину бісектриси на діаграмі, проведеній з початку координат з кривими власних частот, дорівнюють критичним частотам ротора. [423]

Цікаво, що діаграма Кемпбелла є наочним доказом теореми про взаємне розташування спектрів критичної та власної частот [424]. Зокрема, критичні частоти нижче робочої швидкості нижчі за відповідні власні частоти. І навпаки, критичні частоти вище робочої швидкості вищі за відповідні власні частоти.

3. Порівняння результатів

Для підтвердження достовірності математичної моделі динаміки ротора, створеної в програмі “Критичні частоти ротора”, необхідно порівняти отримані в ній результати з даними чисельного моделювання в програмному забезпеченні ANSYS. Таке порівняння наведено в таблиці 3. У ній наведено значення критичних і власних частот, оцінені програмами MathCAD і ANSYS, а також відсоткову різницю між отриманими результатами. [423]

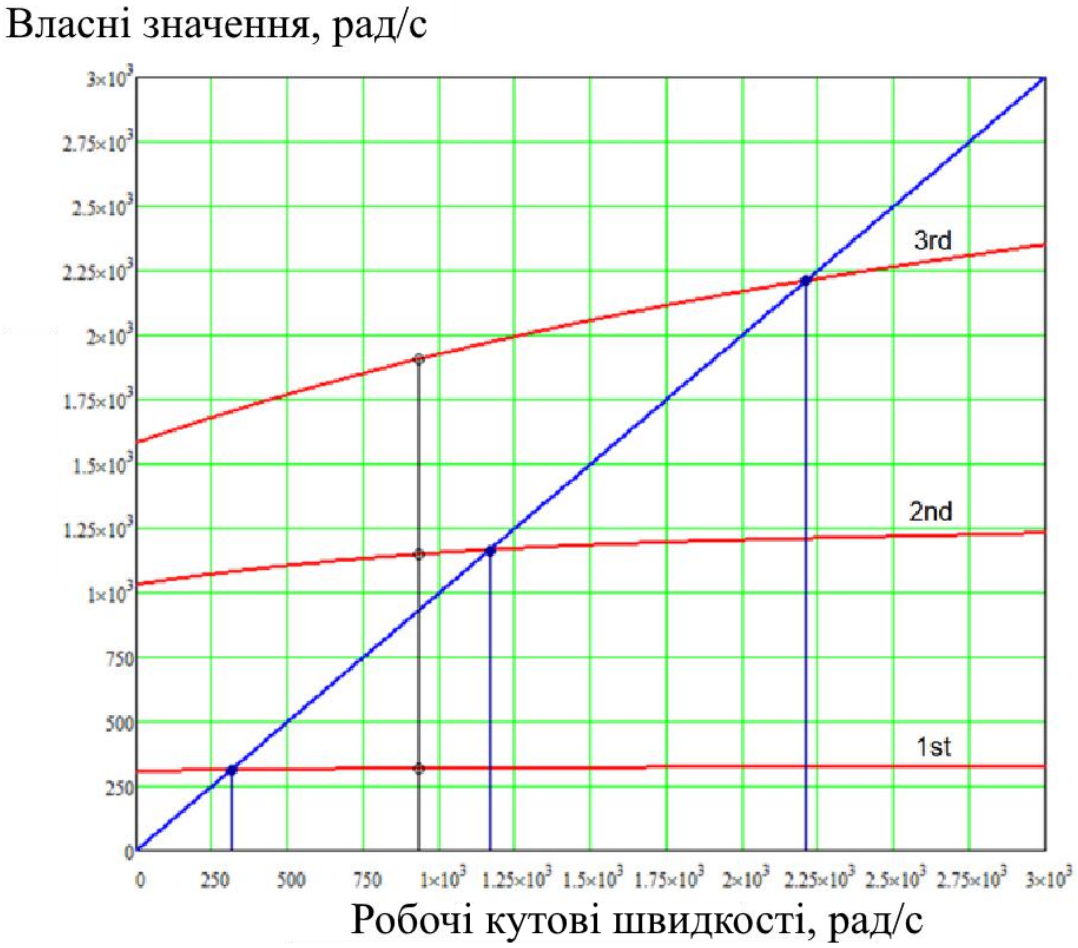


Рисунок 2.5 – Діаграма Кемпбела

Таблиця 2.2 – Порівняння результатів розрахунку

No.	Власні частоти, рад/с		Відносне відхилення, %	Критичні частоти, рад/с		Відносне відхилення, %
	ANSYS	MathCAD		ANSYS	MathCAD	
1	318,8	318	0,25	312,9	312	0,28
2	1125,0	1148	1,97	1140,0	1164	2,06
3	1867,0	1906	2,04	2150,0	2210	2,72

2.1.2 Динаміка та стійкість ротора відцентрового насоса CPN 600-35 для атомних електростанцій

Забезпечення енергоефективності та вібронадійності відцентрових машин є одним із першочергових завдань їх проектування та експлуатації [425]. Це завдання полягає в тому, щоб забезпечити стабільність обертання і досить низький рівень вібрації. Це посилюється наявністю в енергетичних машинах не тільки відцентрових сил, викликаних дисбалансом, з частотою, що дорівнює частоті обертання, але і високочастотних сил (наприклад, лопатевої складової) з частотами, що багаторазово перевищують частоту обертання ротора [426].

Слід зазначити, що при втраті стійкості, яку можна оцінити на основі лінійної моделі коливань ротора, сумарні амплітуди не можуть перевищувати допустимі. Проте виникають неприпустимі автоколивання, характерні для нелінійних динамічних систем. [427]

Їх наявність можна визначити за допомогою спектрального аналізу [428]. У цьому випадку невідповідний стан динаміки ротора можна виявити за допомогою спеціального обладнання, що не завжди забезпечується при роботі силових машин.

Відповідно до вищезазначеного актуальною проблемою є динаміка та стійкість ротора відцентрових насосів для атомних електростанцій, зокрема з огляду на внутрішнє тертя [429]. Його вирішення доповнюється сучасними обчислювальними засобами в них комплексно поєднаними з аналітичними методами. Тому основною метою є розробка загального підходу до забезпечення вібраційної надійності відцентрових насосів для атомних електростанцій. [427]

Наукова новизна даного дослідження полягає в розгляді одномасової моделі динаміки ротора. У цій моделі еквівалентна маса та жорсткість визначаються підходом ідентифікації параметрів на основі скінчено-елементного аналізу динаміки ротора [430]. У цьому випадку умови стійкості визначаються аналітичною залежністю. Крім того, слід також проаналізувати вплив основних конструктивних параметрів і режимів роботи на динамічну стійкість руху ротора.

Останні досягнення в динаміці та стабільності ротора представлені в ряді наукових публікацій по всьому світу. Чжоу та ін. [431] провели багаточастотний експеримент синхронізації з вібраційною системою подвійного ротора. У результаті був розроблений критерій стійкості між ексцентричними роторами на основі принципу Пуанкаре–Ляпунова. Кумар і Аффіюлла [432] вивчали динаміку ротора для енергетичних систем. В результаті була запропонована система контролю стабільності ротора. Лі та ін. [433] досліджували витоки та динамічні характеристики для різних кільцевих газових ущільнень, що працюють у надкритичних турбомашинах. У результаті було показано, що гальмо завихрення на вході значно зменшує швидкість попереднього завихрення, знижуючи частоту переходу для максимізації діапазону робочих частот. Чао та ін. [434] запропонував ієрархічну методологію керування потоком електроенергії в розумних мережах. У результаті було покращено стабільність ротора з гнучкістю з боку вимог. Челабі та ін. [435] підкреслив досягнення в аналізі просторового прискорювального потоку в роторі змішаної турбіни. Соколов та ін. [436] запропоновано методику проектування електрогідравлічного приводу обертового руху для забезпечення вібронадійності технологічного обладнання.

Крім того, Лі та ін. [437] запропонував методологію динамічного балансування для магнітних підшипників опорних жорстких роторів на основі спостерігачів розширеного стану. Філсуф та ін. [438] досліджували критичні аеропружні режими трироторної вітрової турбіни. В результаті було показано, що динаміка нижніх роторів суттєво змінюється як за власними частотами, так і за коефіцієнтами демпфування. Чен та ін. [439] досліджували динаміку вібраційної системи, що приводиться в рух трьома гомодромними ексцентричними роторами з використанням синхронізації керування. В результаті були створені основи проектування вібраційних машин з використанням синхронізації керування. Ященко та ін. [440] досліджували вплив корпусів підшипників на динаміку ротора відцентрового насоса.

Крім того, Шресфа та Гонзалес-Лонгат [441] провели параметричний аналіз чутливості показників стабільності кута ротора. У результаті була

запропонована методологія для оцінки часу усунення критичної несправності, точок власних значень, коефіцієнта демпфування, відхилення частоти, відхилення напруги та відхилення швидкості генератора. Лі та ін. у роботі [442] досліджено динаміку та стійкість роторно-підшипникової системи з болтово-дисковим з'єднанням. Крол та ін. [443] досліджували вібростійкість шпиндельних вузлів для забезпечення оптимальних параметрів динаміки ротора та стійкості відцентрового насоса CPN 600-35 35 технологічного обладнання. Дзян [444] запропонував комплексний підхід, заснований на кінцево-елементному аналізі та багатоцільовій оптимізації для вивчення динаміки гнучких роторних підшипникових систем.

Крім того, Лі і Тхан [445] чисельно змоделювали високошвидкісну систему шпинделя з підшипником кочення та подвійним ротором за допомогою динаміки дискретного моделювання. Чжан та ін. [446] досліджували динамічні характеристики нового ущільнення кишенькового демпфера з саморегульованим уприскуванням. Лю та ін. [447] запропонували систему керування безпілотними літальними апаратами з чотирикутним поворотним ротором на основі пасивності. Чжао та ін. у роботі [448] досліджено вібраційні характеристики системи гвинтового ротора в змішаній модифікації. Також Осадчий та ін. [449] розроблено комплексну технологію виготовлення зубчастих систем. Крім того, Воліна та ін. [450, 451] та Пилипака та ін. [452] досліджували рух лопатей у відцентрових машинах.

Нарешті, Саїд та ін. [453] досліджували нелінійну динаміку та біфуркації руху системи активних магнітних підшипників ротора з новою схемою керування. Крім того, отримано низку наукових результатів щодо підвищення трибологічних характеристик функціональних матеріалів [454]. Зокрема, Тарельник та ін. [455] розроблено сучасний метод наплавлення сталевих валів. Крім того, Марцинковський та ін. [456] запропонував захист валів і муфт. Крім того, Свіржевський та ін. у роботі [457] проаналізовали методи оцінки зносостійкості контактних поверхонь підшипників кочення. Нарешті, Котляр та ін. [458] запропонували підхід до забезпечення критеріїв надійності та продуктивності роторних систем.

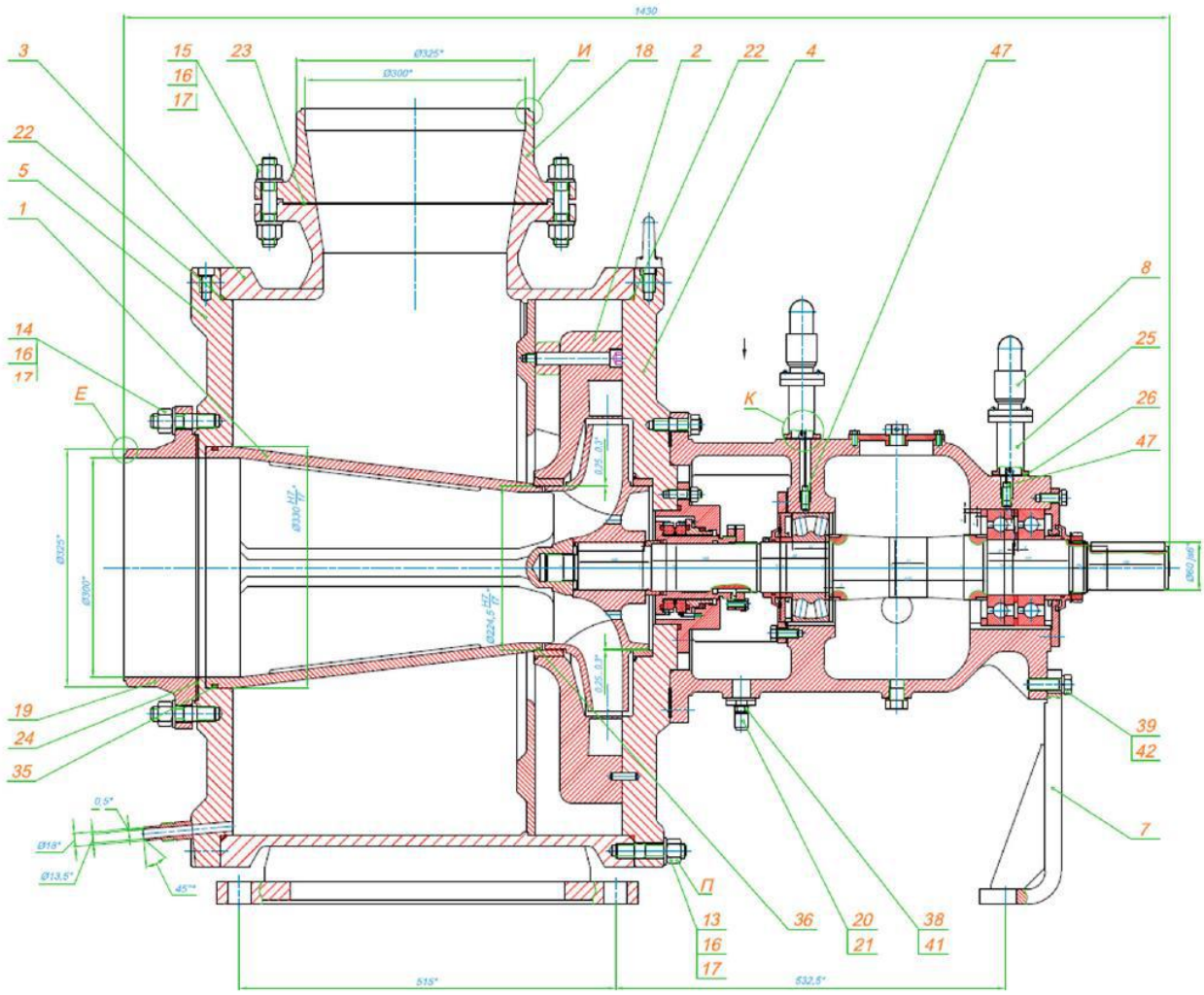


Рисунок 2.6 – Збірка відцентрового насоса CPN 600-35

Методологія дослідження

1. Конструкція відцентрового насоса

Багатоступінчастий відцентровий насос СРН 600-35 забезпечує водопостачання промислового контуру атомних електростанцій. Його номінальні параметри: подача 600 м^3/год, напір 35 м, робоча частота 1500 об/хв. Конструкція насоса повинна відповідати наступним національним стандартам щодо правил і норм в атомній енергетиці відповідно до вимог ДП «НАЕК «Енергоатом»: СОУ НАЕК 158:2020 «Забезпечення технічної безпеки. Технічні вимоги до конструкції та безпечної експлуатації обладнання та трубопроводів атомних електростанцій з ВВЕР», 159:2020 «Забезпечення технічної безпеки. Зварювання та наплавлення обладнання та трубопроводів атомних електростанцій з ВВЕР», 160:2020 «Забезпечення технічної безпеки. Контроль

якості зварних з’єднань основного металу та наплавлення обладнання та трубопроводів атомних електростанцій з ВВЕР»; ПНАЕ Г-7-002-86 “Правила розрахунку на міцність обладнання та трубопроводів атомних електростанцій”. [427]

Конструкція ротора представлена на рис. 2.7. Він містить пару підшипникових опор. Перший – сферичний дворядний підшипник кочення SKF 22314 E з наступними характеристиками: базове динамічне навантаження 413 кН; максимальне втомне навантаження 45 кН; максимальна швидкість обертання 4500 об/хв. Другий — подвійні радіально-упорні кулькові підшипники SKF 7315 BECBJ з такими параметрами для кожного підшипника: базове динамічне навантаження 104 кН; максимальне втомне навантаження 4,15 кН; максимальна швидкість обертання 5300 об/хв.

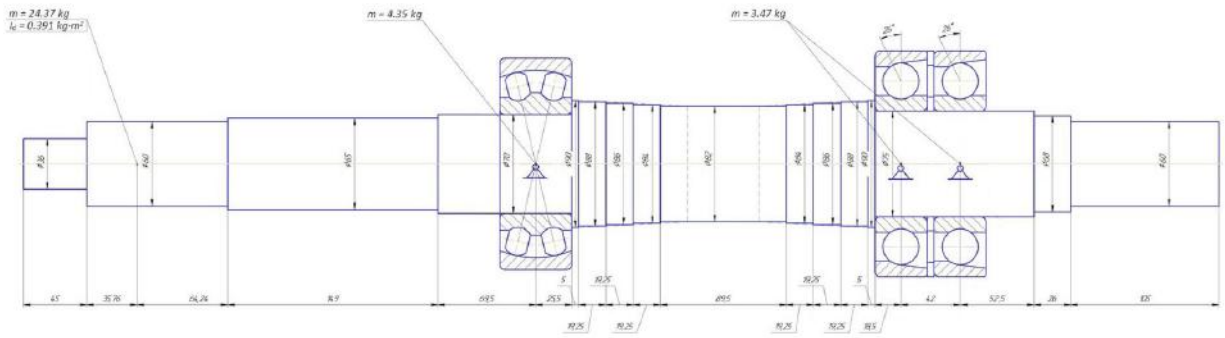


Рисунок 2.7 – Вузол (а), традиційна конструктивна схема (б) і одномасова конструктивна схема (б) ротора: m – місцеві маси підшипників, кг; I_d – діаметральний момент інерції робочого колеса, кг·м^2

2. Ідентифікація параметрів одномасової моделі

Проблема динаміки ротора в основному досліджується методом скінченних елементів. Однак це не дозволяє аналітично оцінити динамічну стійкість роторних систем. Таким чином, підхід ідентифікації параметрів використовується комплексно з аналізом кінцевих елементів і аналітичним підходом. Процедура ідентифікації параметрів одномасової математичної моделі динаміки ротора базується на гіпотезі про те, що податливість ротора та його

перша власна частота можуть бути такими ж, як і для скінченно-елементної моделі. У зв'язку з цим повинні виконуватися наступні рівняння:

$$c_e = \frac{F_{unit}}{x_{res}}; \quad m_e = \frac{c_e}{\omega_1^2}, \tag{2.8}$$

де c_e – еквівалентна жорсткість, Н/м; m_e – еквівалентна маса, кг; F_{unit} – одинична сила, прикладена в центрі мас робочого колеса при близькому до нуля значенні робочої частоти, Н; x_{res} – результуюче переміщення центру мас робочого колеса, м; ω_1 – 1-ша власна частота.

3. Математична модель динаміки одномасового ротора

Запропонована модель динаміки ротора в складному вигляді виглядає наступним чином (рис. 2.8):

$$m_e\ddot{z} + c_e z = D\omega_0^2 e^{i(\omega_0 t+\varphi)} + F_c + F_b + F_q + F_\zeta, \tag{2.9}$$

де $z = x + i\cdot y$ – комплексне зміщення центру мас; x, y – складові переміщення центру мас у площині, перпендикулярній до осі обертання, м; D – допустимий залишковий дисбаланс, кг·м; ω_0 – робоча швидкість, рад/с; t – час, с; ϕ – фазовий зсув, рад; i – уявна одиниця.

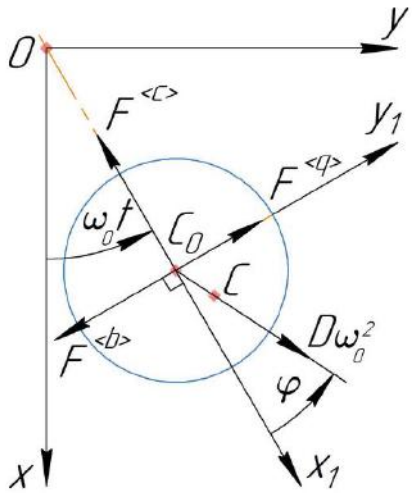


Рисунок 2.8 – Розрахункова схема коливань ротора: x, y – глобальні координати; x_1, y_1 – локальні координати; C_0 – геометричний центр перерізу; C – центр мас ротора

Ця модель також включає гідродинамічні сили, що діють на робоче колесо, зокрема гідродинамічну силу F_c жорсткості, пропорційну переміщенню, демпфіруючу силу F_b, пропорційну швидкості, і циркуляційну силу F_q, пропорційну поперечним переміщенням.

$$F_c = -c_0 z; \quad F_b = -b_0 \dot{z}; \quad F_q = i q_0 z, \tag{2.10}$$

де c_0 – коефіцієнт гідродинамічної жорсткості, Н/м; b_0 – коефіцієнт демпфування, Н·с/м; q_0 – коефіцієнт сили циркуляції, Н/м.

Гідродинамічні коефіцієнти визначаються такими залежностями [459]:

$$c_0 = \frac{\pi d_0 l_0}{4 h_0} \Delta p_0; \quad b_0 = \frac{\pi \mu d_0 l_0^3}{24 h_0^3}; \quad q_0 = \frac{1}{2} b_0 \omega_0, \tag{2.11}$$

де d_0, l_0, h_0 – діаметр, довжина та радіальний зазор дроселя, м; μ – динамічна в'язкість робочої рідини, Па·с/м; Δp_0 – різниця тиску на зазорі, Па.

Додатково враховується сила внутрішнього в'язкого тертя, пропорційна відносній швидкості. Його значення в рухомій і нерухомій системах координат такі [460]:

$$F_{1\zeta} = -\zeta \dot{z}_1; \quad F_\zeta = -\zeta \left(\dot{z} - i \omega_0 z \right), \tag{2.12}$$

де ζ – коефіцієнт внутрішнього тертя, Н·с/м.

У загальному вигляді початкове диференціальне рівняння динаміки ротора (2.9) набуває вигляду:

$$m_e \ddot{z} + \left(b_0 + \zeta \right) \dot{z} + \left[c_e + c_0 - i \left(q_0 + \zeta \omega_0 \right) \right] z = D \omega_0^2 e^{i(\omega_0 t + \varphi)}, \tag{2.13}$$

або в проекціях на координати x і y, враховуючи формулу (2.11):

$$\begin{cases} m_e\ddot{x}+\left(b_0+\zeta\right)\dot{x}+\left(c_e+c_0\right)x+\frac{1}{2}\left(b_0+2\zeta\right)\omega_0 x=D\omega_0^2\cos\left(\omega_0 t+\varphi\right); \\ m_e\ddot{y}+\left(b_0+\zeta\right)\dot{y}+\left(c_e+c_0\right)y+\frac{1}{2}\left(b_0+2\zeta\right)\omega_0 y=D\omega_0^2\sin\left(\omega_0 t+\varphi\right). \end{cases} \tag{2.14}$$

4. Динамічна стійкість руху ротора

Відомо, що внутрішнє тертя не впливає на амплітудно-частотну характеристику. Однак вплив цієї сили на стійкість ротора не враховувався повністю.

Динамічну стійкість руху ротора можна досліджувати за критерієм Рауса-Гурвіца [461]. У цьому випадку компоненти в правих частинах рівнянь. (2.10) дорівнюють нулю, і вводиться диференціальний оператор *p*. Отже, можна отримати систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \left[m_e p^2+\left(b_0+\zeta\right)p+c_e+c_0\right]x+\frac{1}{2}\left(b_0+2\zeta\right)\omega_0 y=0; \\ -\frac{1}{2}\left(b_0+2\zeta\right)\omega_0 x+\left[m_e p^2+\left(b_0+\zeta\right)p+c_e+c_0\right]y=0. \end{cases} \tag{2.14}$$

Отже, внутрішнє тертя збільшує умови, що стосуються демпфірування та циркуляційних сил.

Відповідне характеристичне рівняння має такий вигляд:

$$\left\|\begin{bmatrix} m_e p^2+\left(b_0+\zeta\right)p+c_e+c_0 & \frac{1}{2}\left(b_0+2\zeta\right) \\ -\frac{1}{2}\left(b_0+2\zeta\right)\omega_0 & m_e p^2+\left(b_0+\zeta\right)p+c_e+c_0 \end{bmatrix}\right\|=\sum_{j=0}^{4}a_j p^{4-j}=0, \tag{2.15}$$

де введено такі коефіцієнти:

$$a_0 = m_e^2;\ a_1 = 2\left(b_0 + \zeta\right)m_e;\ a_2 = \left(b_0 + \zeta\right)^2 + 2\left(c_e + c_0\right)m_e;$$
$$a_3 = 2\left(b_0 + \zeta\right)\left(c_e + c_0\right);\ a_4 = c^2 + \left(b_0 + \zeta\right)\zeta\omega_0^2 + \frac{1}{4}b_0^2\omega_0^2. \tag{2.16}$$

Від'ємні частини розв'язків p_j визначають область стійкості руху ротора.

Відповідно до критерію Рауса-Гурвіца ця вимога повністю виконується для таких нерівностей:

$$\begin{cases} a_j = 0; \\ \Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 = 2m_e\left(b_0 + \zeta\right)\left[\left(c_e + c_0\right)m_e + \left(b_0 + \zeta\right)^2\right] > 0; \\ \Delta_2 a_3 - a_1^2 a_4 = m_e\left(b_0 + \zeta\right)\left[\left(c_e + c_0\right)\left(b_0 + \zeta\right)^2 - m_e\left(b_0 + 2\zeta\right)^2\omega_0^2\right] > 0. \end{cases} \tag{2.17}$$

Дві перші з цих нерівностей виконуються автоматично. Однак останнє призводить до наступної умови стійкості (рис. 2.9):

$$\psi\left(\chi\right) < \frac{2\left(1 + \chi\right)}{1 + 2\chi}, \tag{2.18}$$

де введено наступну безрозмірну частоту ψ та коефіцієнт тертя χ:

$$\psi = \frac{\omega_0}{\omega_{cr}}; \quad \chi = \frac{\zeta}{b}, \tag{2.19}$$

де ω_{cr} – критична частота.

Тому, незважаючи на те, що внутрішнє тертя не впливає на амплітудно-частотну характеристику, воно впливає на стабільність ротора. Крім того, згідно з критерієм стабільності максимальна робоча частота повинна бути меншою за максимальне значення $\psi\omega_{cr}$, де безрозмірний коефіцієнт змінюється в діапазоні 1

≤ ψ<2 залежно від значення коефіцієнт внутрішнього тертя ζ. Примітно, що якщо безрозмірна частота ψ<1, то рух ротора є стійким для цілого діапазону змін коефіцієнта внутрішнього тертя.

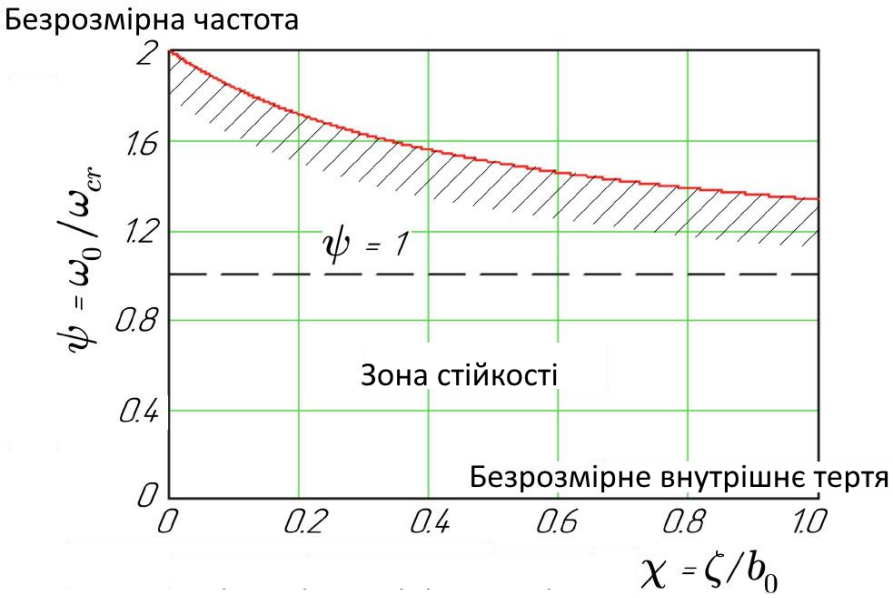


Рисунок 2.9 – Область стійкості руху ротора

Результати

Вихідні дані для динамічного аналізу та стійкості розробленого відцентрового насоса CPN 600-35 на основі скінчено-елементної моделі наведені в табл. система алгебри MathCAD.

Традиційна розрахункова схема, що відповідає рис. 2.8 і табл. 2.2, представлена на рис. 2.9.

Перші три отримані моди вільних коливань представлені на рис. 2.10.

Відповідні критичні частоти отримано методом скінченних елементів з використанням авторського операційного файлу «Критичні частоти ротора» системи комп'ютерної алгебри MathCAD. Відповідні значення: ω_{cr1} = 702 рад/с, ω_{cr2} = 2525 рад/с, а ω_{cr3} = 9995 рад/с. [427]

Надійність цієї моделі підтверджується аналогічними результатами, отриманими за допомогою програмного забезпечення ANSYS (рис. 2.11).

Таблиця 2.3 – Вихідні дані динамічного аналізу [427]

№ ділянки	Довжина, м	Діаметр, м	Зосереджена маса, кг	Момент інерції, кг·м^2	Жорсткість, Н/м
1	0.045	0.036	–	–	–
2	0.036	0.060	–	–	–
3	0.064	0.060	24.37	0.391	–
4	0.149	0.065	–	–	–
5	0.07	0.070	–	–	–
6	0.026	0.070	4.35	–	$1\cdot10^{12}$
7	0.005	0.090	–	–	–
8	0.057	0.086	–	–	–
9	0.090	0.082	–	–	–
10	0.057	0.086	–	–	–
11	0.005	0.090	–	–	–
12	0.019	0.075	–	–	–
13	0.042	0.075	3.47	–	$1\cdot10^{12}$
14	0.053	0.075	3.47	–	$1\cdot10^{12}$
15	0.026	0.068	–	–	–
16	0.105	0.060	–	–	–

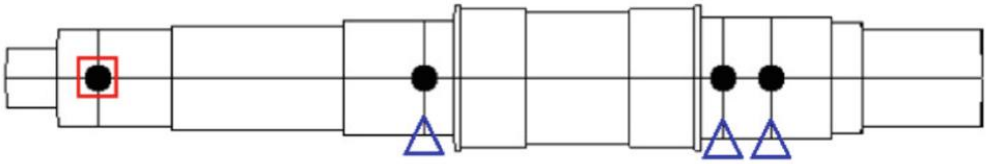


Рисунок 2.10 – Традиційна конструктивна схема ротора: △ – підшипникова опора; ● – зосереджена маса; □ - момент інерції.

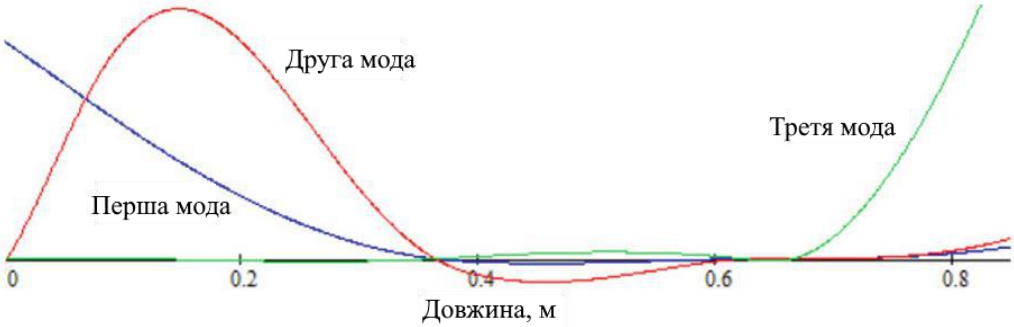
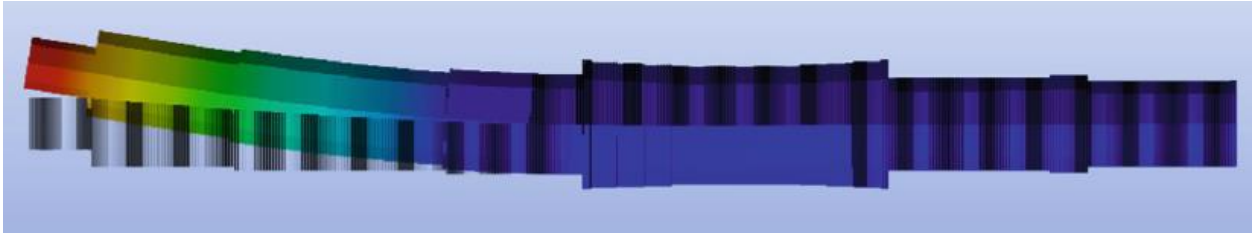
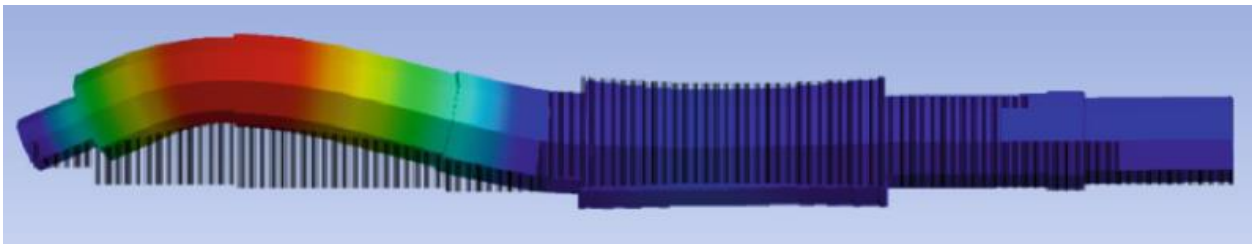


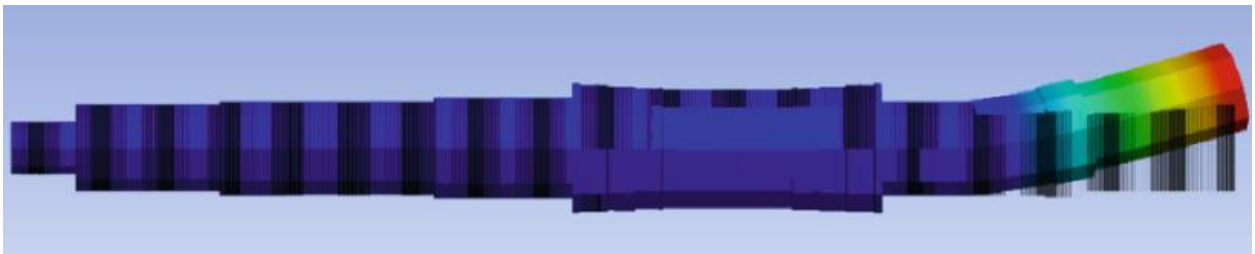
Рисунок 2.11 – Форми мод вільних коливань, отримані за допомогою програми «Критичні частоти ротора» [427]



а)



б)



в)

Рисунок 2.12 – Форми вільних коливань 1-ї (а), 2-ї (б) та 3-ї (в) мод, отримані за допомогою програмного забезпечення ANSYS [427]

Порівняння результатів, отриманих за допомогою програм MathCAD та ANSYS, представлено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Порівняння результатів

Програмне забезпечення	Власні частоти, рад/с		
	Перша	Друга	Третя
MathCAD	702	2525	9995
ANSYS	687	2432	8723
Відносна похибка, %	2.2	3.8	14.6

Відносна похибка оцінки 1-ї власної частоти ω_1 не перевищує 2,2 %. Таким чином, авторська методика, реалізована в рамках операційного файлу «Критичні

частоти ротора», є надійною для розробленого відцентрового насоса CPN 600-35 для атомних електростанцій. [427]

Слід зазначити, що оскільки 1-а критична частота ω_{cr1} = 732 рад/с в 4,47 рази перевищує робочу швидкість ω_0 = 157 рад/с, то відбудова від резонансу дорівнює 347 %. Тому механічні вібрації можна розглядати згідно з міжнародним стандартом ISO 1940-1:2003 «Механічна вібрація – Вимоги до якості балансу для роторів у постійному (жорсткому) стані – Частина 1: Специфікація та перевірка допусків балансу (IDT)». [427]

Відповідно до формули (2.8) еквівалентну жорсткість можна визначити методом скінченних елементів з використанням авторського операційного файлу «Вимушені коливання ротора» системи комп'ютерної алгебри MathCAD. Після розрахунків відповідне значення дорівнює c_e = 2,02·107 Н/м. Також еквівалентна маса (2.8) дорівнює m_e = 41,0 кг. Крім того, для конкретного прикладу були враховані такі фізичні та геометричні параметри дроселюючих зазорів: різниця тиску $\Delta p_0 = 3{,}43\cdot10^5$ Па; динамічна в'язкість робочої рідини при нормальних умовах $\mu = 1{,}0\cdot10^{-3}$ Па·с. Відповідно до конструкції насоса (рис. 2.6) враховано такі геометричні параметри радіального дроселя: діаметр d_0 =0,2245 м; довжина l_0 =0,045м; проміжок h_0 =(0,25…0,30)·10^{-3} м. За формулами (2.11) і (2.21) оцінено наступні параметри: коефіцієнт демпфування b_0 = 99,1…171,4 Н·с/м.

Завдяки результатам, представленим Роєм і Тіварі [462], для подібного ротора та за загального припущення, що коефіцієнт варіації дорівнює 0,2, коефіцієнт тертя в діапазоні трьох сигм дорівнює ζ = 8…32 Н ·с/м. Згідно з формулою (14) безрозмірний коефіцієнт тертя χ = 0,047…0,323, а безрозмірна частота ψ = 0,180…0,186.

Нарешті, максимальна безрозмірна частота (2.20) дорівнює ψ_{max} = 1,608. Отже, оскільки це значення в 8,64 рази більше значення ψ = 0,186, рух ротора є стабільним із запасом 764 %.

2.1.3 Ідентифікація параметрів дискретно-масової математичної моделі коливань колінчастого валу

Колінчасті вали є найбільш навантаженими і, отже, найбільш відповідальними частинами поршневих двигунів і компресорних установок [463]. Спочатку найнебезпечнішими вважалися крутильні коливання колінчастих валів. Однак після впровадження загальних підходів до управління крутильними коливаннями шляхом відстроювання від резонансу, використання демпферів та антивібраторів, а потім із постійним підвищенням характеристик двигунів (наприклад, швидкості та потужності) та полегшенням їх конструкцій виникають проблеми динамічної міцності, пов’язаної з згинальними коливаннями [464].

Примітно, що в деяких конструкціях двигунів згоряння в циліндрах відбувається нерівномірно. Це призводить до пульсацій крутного моменту [465]. В основному зворотно-поступальний рух поршнів призводить до виникнення додаткових сил інерції [466]. Оскільки шатун у двигуні рухається по площині, метод гармонійного балансу повинен лінеаризувати нелінійні складові [467]. У цьому випадку серед сил інерції є вищі гармоніки, кратні швидкості обертання колінчастого вала. Підвищені вібрації можуть виникати також через несправності допоміжних агрегатів, що приводяться в дію ременем, маховиком і дисками зчеплення [468].

Примітно, що збільшення частот і амплітуд зовнішнього впливу на колінчастий вал і зменшення матеріаломісткості (що супроводжується зменшенням жорсткості) викликають резонансні коливання. Отже, усунення цих коливань є актуальною проблемою динаміки ротора. При цьому, незважаючи на те, що дослідження крутильних коливань та їх впливу на роботу трансмісії можливе на відносно простих моделях, вібраційна надійність колінчастих валів потребує більш складних математичних моделей згинальних коливань. [423]

У зв’язку із зазначеним вище та дослідженням крутильних коливань у наукових роботах [469, 470] колінчастий вал розглядають як статично невизначену просторову раму під дією сил тиску газів, сил інерції дисбалансів та

навісних частин кривошипно-шатунних механізмів. Однак ці моделі квазістатичні. Крім того, не враховуються гідродинамічні та контактні сили, які впливають на втрату стійкості прецесії вала [471], виникнення биття та підвищений знос шийок вала та втулок корпусу [472].

При проектуванні та виготовленні колінчастих валів та їх деталей особлива увага приділяється їх балансуванню [473], в основному через порушення технології монтажу/розбирання двигуна та його неправильну комплектацію новими запчастинами. Ця проблема є важливою для машин, у яких колінчастий вал збалансований як вузол з маховиком і зчепленням. Неправильне встановлення компонентів, заміна деталі зі збалансованого комплекту на іншу також спричиняють підвищену вібрацію двигуна. Це значно підвищує шум, динамічні навантаження на опори підшипників, що скорочує термін служби валів і підшипників.

У зв’язку з цим підвищення ефективності балансування колінчастого вала можливе у разі створення надійної математичної моделі його вільних і вимушених коливань. Слід зазначити, що для раціонального вибору площин поправок і пробних значень дисбалансів можна попередньо провести процедуру балансування [474].

Крім того, незважаючи на велику кількість наукових робіт, присвячених крутильним коливанням колінчастого вала, проблеми згинальних коливань залишаються не до кінця вивченими через наступні істотні причини. По-перше, на відміну від ротора турбомашини колінчастий вал має природну анізотропію властивостей жорсткості [475]. По-друге, маса вала розподілена по його довжині нерівномірно, а лінія центрів мас є ламаною просторовою кривою. Ці факти унеможливлюють реалізацію аналітичних методів дослідження неперервних моделей. Крім того, на шийки вала діє складна система нелінійних сил (наприклад, демпфування, нелінійне тертя та циркуляційна сила). Розгляд цих сил є складною проблемою для сучасної наукової спільноти. Також важко врахувати сили внутрішнього тертя між волокнами матеріалу вала при його деформаціях.

Крім того, робота колінчастого вала в нерозрахункових або перехідних режимах супроводжується тертям і биттям шийок об втулки корпусу, що призводить до інтенсивного зношування [476, 477]. Щоб запобігти цьому явищу, необхідно вивчити вимушені коливання колінчастого вала з урахуванням сил, які їх викликають.

Тому створення узагальненого підходу до побудови математичної моделі, що дозволяє уточнити малодосліджені (згинальні) коливання колінчастих валів, є актуальною проблемою сучасної динаміки роторів в галузі проектування поршневих двигунів внутрішнього згоряння [478] в автомобільній [479, 480], авіаційній [481], сільськогосподарській [482, 483], морській [484] і військовій промисловості [485], поршневих компресорних установках високого тиску [486].

Для висвітлення основних цілей дослідження було ретельно проаналізовано наступну літературу. Зокрема, Ю та ін. [487] виконано колінчастий вал.

Методи та матеріали

1. Параметрична ідентифікація дискретних мас

Основна ідея створення дискретно-масової математичної моделі коливань колінчастого вала полягає в оцінці відповідних дискретних мас на площинах корекції. Відповідна послідовність така.

1) Відповідно до досвіду балансування колінчастих валів, місця розташування площин корекції вибираються сумарно n ≥ 2. При цьому кількість розрахункових дискретних мас також дорівнює n.

2) На основі статичного структурного аналізу кінцево-елементної моделі колінчастого вала визначаються переміщення валу $x_{i,j}$ і $y_{i,j}$ м у площинах XZ і YZ для одиничних сил F_{ix} і F_{iy} N. Ці сили прикладені в j-й площині (рис. 2.13), де i – номер площини корекції ($i, j = 1, 2, \ldots, n$). У результаті квадратні матриці [α], [β] податливості розмірністю n×n оцінюються їх елементами m/N [427]:

$$\alpha_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{F_{ix}};\ \beta_{i,j} = \frac{y_{i,j}}{F_{iy}}. \tag{2.20}$$

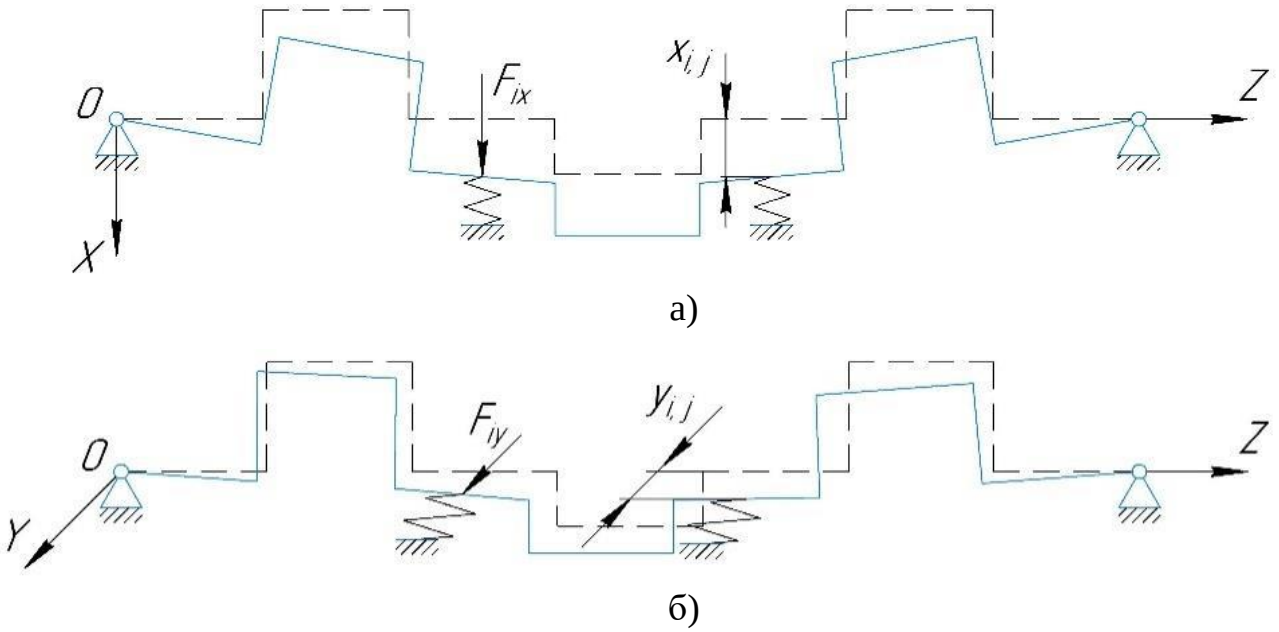


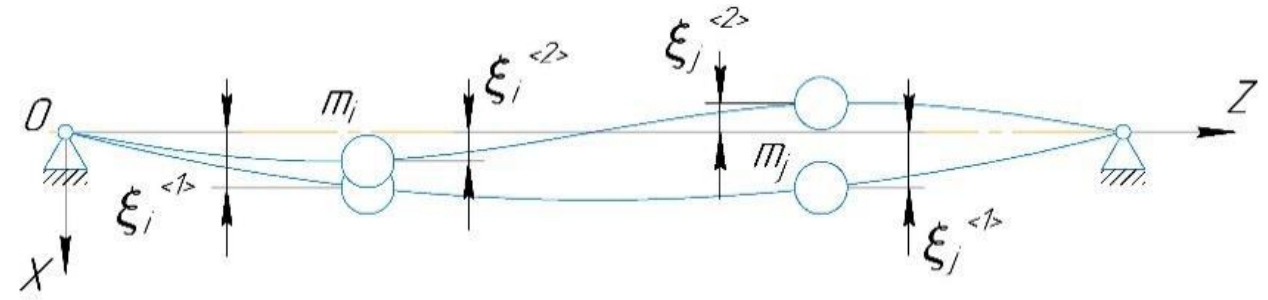
Рисунок 2.13 – Розрахункові схеми статичного структурного аналізу для площин XZ (а) та YZ (б) [427]

Примітно, що на відміну від існуючих методів параметричної ідентифікації динаміки ротора, формула (2.20) містить різні матриці податливості для двох взаємно перпендикулярних напрямків X і Y. Цей факт пояснюється властивою йому природною анізотропією сил пружності колінчастого вала.

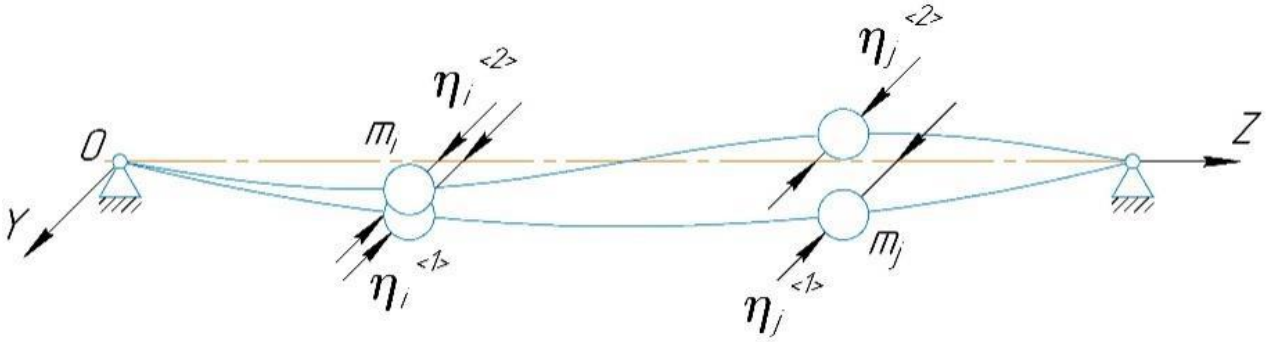
3) На основі модального аналізу скінчено-елементної моделі колінчастого вала визначаються власні частоти вільних коливань ω_k [рад/с] з відповідними формами мод $\{\xi^{<k>}\}$ і $\{\eta^{<k>}\}$. Останні як стовпці-вектори розмірності n×1 містять безрозмірні переміщення $\xi_i^{<k>}$ і $\eta_i^{<k>}$ у напрямках двох взаємно перпендикулярних осей X і Y (рис. 2.14). [427]

При цьому необхідна кількість розглянутих частот має бути не менше 2n. Цей факт також зумовлений анізотропією жорсткості колінчастого вала в площині XY.

Примітно, що для зручності обчислень необхідно провести нормування елементів стовпців-векторів за їх першими елементами: ξ1<k>=η1<k>=1.



а)



б)

Рисунок 2.14 – Розрахункові схеми модального аналізу для площ XZ (а) та YZ (б)

4. На основі отриманих раніше матриць і векторів-стовпців формуються локальні матриці [A<k>], [B<k>] і вектори-стовпці {X<k>}, {Y<k>} для ідентифікації параметрів дискретної n-масової моделі. Числові значення елементів для цих матриць [m/N] і векторів-стовпців [s2] визначаються таким чином [427]:

$$A_{i,j}^{<k>} = \alpha_{i,j}\xi_i^{<k>};\ B_{i,j}^{<k>} = \beta_{i,j}\eta_i^{<k>};\ X_i^{<k>} = \frac{\xi_i^{<k>}}{\omega_i^2};\ Y_i^{<k>} = \frac{\eta_i^{<k>}}{\omega_i^2}. \qquad (2.21)$$

Фізичний зміст цих елементів полягає в наступному. Зокрема, кожен елемент матриць [A<k>] і [B<k>] є множенням коефіцієнта податливості і безрозмірного переміщення. Крім того, кожен коефіцієнт векторів-стовпців Xi<k> і Yi<k> є співвідношенням між розмірним зміщенням і квадратом власної частоти відповідної форми моди. [427]

Ці дані дозволяють формувати глобальні матриці та вектор-стовпець шляхом укладання локальних матриці та вектор-стовпця:

$$[A_G] = stack([A^{<k>}]);\ [B_G] = stack(B^{<k>});$$
$$\{X_G\} = stack(X^{<k>}); \{Y_G\} = stack(Y^{<k>}). \qquad (2.22)$$

5. Складання глобальних матриць [AG], [BG] і векторів-стовпців {XG}, {YG} дозволяє отримати результуючу комбіновану матрицю [C] і вектор-стовпець {Z} [427]:

$$[C] = stack([A_G],[B_G]); \{Z\} = stack(\{X\},\{Y\}). \quad (2.23)$$

Фізичний зміст матриці [C] і вектора-стовпця {Z} полягає в наступному. Кожен елемент матриці [C] як елемент матриць [AG] або [BG] є множенням коефіцієнта податливості та безрозмірного переміщення. Кожен елемент вектора-стовпця {Z} як елемент вектора-стовпця {XG} або {YG} є співвідношенням між розмірним зміщенням і квадратом власної частоти. [427]

При цьому їх розміри p×n та p×1 відповідно, де p – загальна кількість рядків (p ≥ 2n).

6. Оцінювальні значення дискретних мас mi [кг] є елементами вектора-стовпця n×1, який визначається таким матричним рівнянням [427]:

$$[C]\{m\} = \{Z\}. \quad (2.24)$$

Примітно, що це матричне рівняння отримано за такою послідовністю. Спочатку кожне переміщення xi та yi можна представити як суперпозицію часткових переміщень αi,jFxj та βi,jFyj для сил інерції Д'Аламбера $F_{xj} = -m_j\ddot{x}_j$ та $F_{yj} = -m_j\ddot{y}_j$. На наступному етапі кожне переміщення представлено відповідно до i-ої форми моди: xi = |xi|sinωit, yi = |yi|sinωit. У цьому випадку, оскільки $\frac{d^2}{dt^2}sin\omega_i t = -sin\omega_i t$, амплітуди |xi| та |yi| можуть бути записані як суперпозиція складових $\alpha_{i,j}m_j|x_j|\omega_i^2$ та $\alpha_{i,j}m_j|y_j|\omega_i^2$, відповідно. Нарешті, перехід до безрозиірних переміщень ξi та ηi дозволяє визначити дискретні маси mi за рівнянням (5). У цьому відношенні це рівняння є матричним аналогом наступних алгебраїчних рівнянь: $\xi_i = \sum \alpha_{i,j}m_j\xi_j\omega_i^2$, and $\eta_i = \sum \alpha_{i,j}m_j\eta_j\omega_i^2$. [427]

Примітно, якщо p > n, це рівняння не можна розв’язати безпосередньо за допомогою методу оберненої матриці, оскільки матриця [C] не є квадратною. Відповідно до псевдооберненого метода Мура–Пенроуза перевизначеної системи [488], її розв’язок має бути отриманий за допомогою наступної послідовності еквівалентних перетворень. По-перше, рівняння (5) слід помножити зліва на транспоновану матрицю [C]T:

$$[C]^T[C]\{m\} = [C]^T\{Z\}. \tag{2.25}$$

У цьому рівнянні матриця [C]T[C] є квадратною. Тому після множення ліворуч на матрицю ([C]T[C])–1 і врахування одиничної матриці ([C]T[C])–1[C]T[C], наступна формула лінійної регресії виходить:

$$\{m\} = ([C]^T[C])^{-1}[C]^T\{Z\}. \tag{2.26}$$

Примітно, що через перерозподіл інерційних властивостей для початкової безперервної моделі n-масовою дискретною математичною моделлю, може виявлятися невідповідність алгебраїчної суми мас для дискретно-масової моделі до загальної маси m0 колінчастого вала. Відповідне відносне відхилення мас оцінюється наступним чином:

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i}{m_0}. \tag{2.27}$$

7. У результаті ідентифікації параметрів дискретних мас за формулами (1)–(2.26) будується дискретно-масова математична модель вільних коливань ротора.

$$\begin{cases} x_i = -\sum_{j=1}^{n} \alpha_{i,j} m_j \frac{d^2 x_j}{dt^2}; \\ y_i = -\sum_{j=1}^{n} \beta_{i,j} m_j \frac{d^2 y_j}{dt^2}. \end{cases} \quad (i, j = \overline{1, n}) \tag{2.28}$$

Це система 2n диференціальних рівнянь динаміки ротора (t – час [c]), заснована на принципі Даламбера [489]. Примітно, що права частина містить сили інерції для кожної j-ї дискретної маси. [427]

Точність цієї моделі дискретної маси оцінюється шляхом порівняння власних частот Ωk зі значеннями ωk, попередньо отриманими методом скінченних елементів. У цьому випадку розв'язуємо систему (2.28) наступним чином

$$x_j = a_j sin\Omega_x t;\ y_j = b_j sin\Omega_y t \tag{2.29}$$

для ненульових значень амплітуд aj і bj дозволяє визначити власні частоти як 2n коренів наступних двох алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} det\left[\alpha_{i,j} m_j \Omega_x^2 - \delta_{i,j}\right] &= 0; \\ det\left[\beta_{i,j} m_j \Omega_y^2 - \delta_{i,j}\right] &= 0, \end{aligned} \tag{2.30}$$

де δi,j – символ Кронекера-Капелі.

Власні частоти Ωx, Ωy утворюють результуючий вектор-стовпець 2n×1 моделі дискретної маси:

$$\{\Omega\} = stack\left(\{\Omega_x\}, \{\Omega_y\}\right). \tag{2.31}$$

У результаті відносна похибка параметричної ідентифікації для дискретно-масової моделі за кожною власною частотою має вигляд:

$$\varepsilon_\omega^{<k>} = \frac{\Omega_k - \omega_k}{\omega_k}. \tag{2.32}$$

2. Уточнена дискретно-масова математична модель вимушених коливань

Запропонована ідентифікація параметрів дискретних мас дозволяє отримати дискретно-масову математичну модель вимушених коливань колінчастого вала у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} x_i = \sum_{j=1}^{n} \alpha_{i,j} \left(-m_j \frac{d^2 x_j}{dt^2} + \sum_{l=1}^{s} F_{xj}^{<l>} \right); \\ y_i = \sum_{j=1}^{n} \beta_{i,j} \left(-m_j \frac{d^2 x_j}{dt^2} + \sum_{l=1}^{s} F_{yj}^{<l>} \right); \end{cases} (i, j = \overline{1, n}). \quad (2.33)$$

Ця модель спочатку містить приведені сили пружності (ліва частина) та сили інерції (перші компоненти правої частини). Крім того, ця система включає s додаткових компонентів, що відповідають за лінійні та нелінійні сили різної природи [490], що виникають у зонах шийок валу (рис. 2.15). [427]

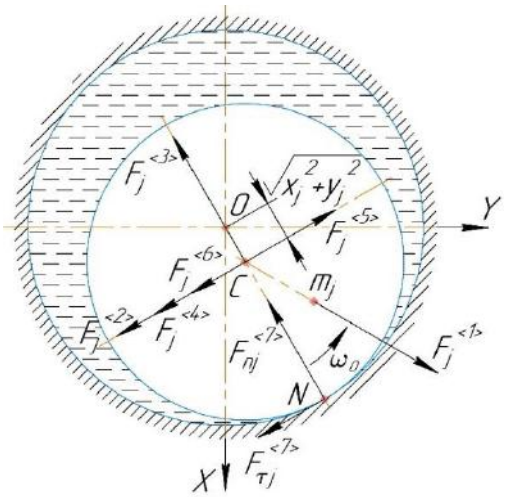


Рисунок 2.15 – Сили, що діють на шийку колінчастого вала:
O, C – геометричні центри втулок і шийки [427]

1. Відцентрова сила інерції системи залишкових дисбалансів Dj [кг·м]:

$$F_{xj}^{<1>} = D_j \omega_0^2 \, sin\left(\omega_0 t + \varphi_j\right); \; F_{yj}^{<1>} = D_j \omega_0^2 \, cos\left(\omega_0 t + \varphi_j\right), \quad (2.34)$$

де ω0 – робоча швидкість [рад/с]; φi – початкова фаза [рад].

2. Зусилля демпфування масляного шару (l = 2):

$$F_{xj}^{<2>} = -b\left(x_j, y_j\right) \frac{dx_j}{dt}; \; F_{yj}^{<2>} = -b\left(x_j, y_j\right) \frac{dy_j}{dt}, \quad (2.35)$$

де b – коефіцієнт демпфування [Н·с/м], який визначається за формулою:

$$b(x_j, y_j) = b_0\left(1 + \frac{3}{2}\frac{x_j^2+y_j^2}{h_0^2}\right); \quad (2.36)$$

де b_0 – коефіцієнт демпфування для випадку нульового ексцентриситету [Н·с/м] в залежності від в'язкості масла та розмірів радіального зазору (тобто діаметра, довжини та зазору); h_0 – середній радіальний зазор між шийкою вала та втулкою корпусу [м].

3. Гідродинамічна сила жорсткості в шарі масла в циліндричному зазорі між шийкою вала і втулкою корпусу:

$$F_{xj}^{<3>} = -c(x_j, y_j)x_j;\ F_{yj}^{<3>} = -c(x_j, y_j)y_j, \quad (2.37)$$

де c – коефіцієнт жорсткості [Н/м], який визначається за формулою:

$$c(x_j, y_j) = c_0\left(1 + \frac{3}{4}\gamma^2\frac{x_j^2+y_j^2}{h_0^2}\right); \quad (2.38)$$

де c_0 – коефіцієнт жорсткості для випадку нульового ексцентриситету [Н/м]; γ – безрозмірна характеристика поверхні зазору.

4. Сила нелінійного тертя:

$$F_{xj}^{<4>} = -f(x_j^2 + y_j^2)x_j;\ F_{yj}^{<4>} = -f(x_j^2 + y_j^2)y_j, \quad (2.39)$$

де f – коефіцієнт нелінійного тертя [Н/м3].

5. Циркуляційна сила, яка впливає на стійкість прецесії ротора:

$$F_{xj}^{<5>} = -q(x_j, y_j)y_j;\ F_{yj}^{<5>} = q(x_j, y_j)x_j, \quad (2.40)$$

де q – коефіцієнт циркуляційної сили [Н/м], який визначається за формулою:

$$q(x_j, y_j) = \frac{1}{2} b(x_j, y_j)\omega_0. \quad (2.41)$$

6. Сила внутрішнього в’язкого тертя:

$$F_{xj}^{<6>} = -\zeta\left(\frac{dx_j}{dt} + \omega_0 y_j\right);\ F_{yj}^{<6>} = -\zeta\left(\frac{dy_j}{dt} - \omega_0 x_j\right), \quad (2.42)$$

де ζ – коефіцієнт внутрішнього в’язкого тертя [Н·с/м].

7. У перехідних режимах колінчастий вал може контактувати зі статором. Це явище призводить до підвищеного зносу як шийки вала, так і втулок корпусу. У цьому випадку слід враховувати силу контактної взаємодії [427]:

$$\begin{aligned} F_{xj}^{<7>} &= -c_s\left(1 - \frac{h_0}{\sqrt{x_j^2+y_j^2}}\right)(x_j - \mu y_j)sign\left(\frac{x_j^2+y_j^2}{h_0^2} - 1\right); \\ F_{yj}^{<7>} &= -c_s\left(1 - \frac{h_0}{\sqrt{x_j^2+y_j^2}}\right)(y_j + \mu x_j)sign\left(\frac{x_j^2+y_j^2}{h_0^2} - 1\right), \end{aligned} \quad (2.43)$$

де cs – коефіцієнт контактної жорсткості [Н/м]; μ – коефіцієнт тертя.

Ця сила має нормальну складову Fnj<7> (нормальна сила реакції) і дотичну складову Fτj<7> (сила тертя).

Примітно, що функція «знак» була додана до цього рівняння для можливості враховувати або не враховувати цю силу залежно від прогину вала порівняно із середнім радіальним зазором. [427]

Важливо відзначити, що комбінація вищезазначених сил, що виникають у масляному шарі між втулками корпусу та шийками вала, є нелінійною. Крім того, вони додають перехресні компоненти до системи рівнянь (2.33). [427]

У результаті врахування виразів (2.34)–(2.43) дозволяє отримати результуючу систему нелінійних диференціальних рівнянь, що описують згинальні коливання колінчастого вала [427]:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} \alpha_{i,j} \left[m_j \frac{d^2 x_j}{dt^2} + b_0 \left(1 + \frac{3}{2} \frac{x_j^2 + y_j^2}{h_0^2}\right) \left(\frac{dx_j}{dt} + \frac{1}{2} \omega_0 y_j\right) + \right. \\ \qquad + c_0 \left(1 + \frac{3}{4} \gamma^2 \frac{x_j^2 + y_j^2}{h_0^2}\right) x_j + \\ \qquad + \zeta \left(\frac{dx_j}{dt} + \omega_0 y_j\right) + f\left(x_j^2 + y_j^2\right) x_j + \\ \left. + c_s \left(1 - \frac{h_0}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2}}\right) \left(x_j - \mu y_j\right) sign\left(\frac{x_j^2 + y_j^2}{h_0^2} - 1\right) \right] + x_i = \\ \qquad = \omega_0^2 \sum_{j=1}^{n} \alpha_{i,j} \left[D_j \, sin\left(\omega_0 t + \varphi_j\right) + F_{xj}^{<*>}\right]; \\ \sum_{j=1}^{n} \beta_{i,j} \left[m_j \frac{d^2 y_j}{dt^2} + b_0 \left(1 + \frac{3}{2} \frac{x_j^2 + y_j^2}{h_0^2}\right) \left(\frac{dy_j}{dt} - \frac{1}{2} \omega_0 x_j\right) + \right. \\ \qquad = c_0 \left(1 + \frac{3}{4} \gamma^2 \frac{x_j^2 + y_j^2}{h_0^2}\right) y_j - \\ \qquad - \zeta \left(\frac{dy_j}{dt} - \omega_0 x_j\right) - f\left(x_j^2 + y_j^2\right) y_j + \\ \left. + c_s \left(1 - \frac{h_0}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2}}\right) \left(y_j + \mu x_j\right) sign\left(\frac{x_j^2 + y_j^2}{h_0^2} - 1\right) \right] + y_i = \\ \qquad = \omega_0^2 \sum_{j=1}^{n} \beta_{i,j} \left[D_j \, cos\left(\omega_0 t + \varphi_j\right) + F_{yj}^{<*>}\right], \end{cases} \tag{2.44}$$

де $F_{xj}^{<*>}$, $F_{yj}^{<*>}$ – компоненти X і Y інших сил не враховувалися в рівняннях (2.34)–(2.43).

Надійність запропонованої моделі підтверджується врахуванням малих коливань колінчастого вала $\left(x_j^2 + y_j^2 \ll h_0^2\right)$. У цьому випадку останнє рівняння значно спрощується шляхом зведення до наступної лінеаризованої форми:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} \alpha_{i,j} \left[m_j \frac{d^2 x_j}{dt^2} + (b_0 + \zeta) \frac{dx_j}{dt} + \frac{1}{2} (b_0 + 2\zeta) \omega_0 y_j + c_0 x_j \right] + x_i = \\ \qquad = \omega_0^2 \sum_{j=1}^{n} \alpha_{i,j} D_j \, sin\left(\omega_0 t + \varphi_j\right); \\ \sum_{j=1}^{n} \beta_{i,j} \left[m_j \frac{d^2 y_j}{dt^2} + (b_0 - \zeta) \frac{dy_j}{dt} - \frac{1}{2} (b_0 - 2\zeta) \omega_0 x_j + c_0 y_j \right] + y_j = \\ \qquad = \omega_0^2 \sum_{j=1}^{n} \beta_{i,j} D_j \, cos\left(\omega_0 t + \varphi_j\right). \end{cases} \tag{2.45}$$

Примітно, що лінеаризацію можна реалізувати за допомогою методу малих збурень для компонентів переміщень xi та yi. У цьому випадку xi = xi0 + δxi, yi = yi0 + δyi, де xi0, yi0 – початкові переміщення, а δxi, δyi – їх збурення.

Зокрема, для одномасової моделі (n = 1) та відсутності внутрішнього тертя (ζ = 0) ця система зводиться до одномасової моделі:

$$\begin{cases} m\frac{d^2x}{dt^2} + b_0\frac{dx}{dt} + (c_x + c_0)x + q_0 y = D\omega_0^2 \sin\omega_0 t\,; \\ m\frac{d^2y}{dt^2} + b_0\frac{dy}{dt} + (c_y + c_0)y - q_0 x = D\omega_0^2 \cos\omega_0 t\,, \end{cases} \tag{2.46}$$

де cx = 1/α2, cy = 1/β2 – осьові коефіцієнти жорсткості на згин анізотропного колінчастого вала [Н/м]. У рівняннях (2.44)–(2.45) знак варіації «δ» видалено, щоб спростити позначення.

Цей факт доводить достовірність розробленої узагальненої дискретно-масової моделі (2.44).

Таким чином, запропонована математична модель дає можливість розглядати як багатомасовий приклад, так і нелінійні складові сил, що виникають в масляному шарі між шийками вала та втулками корпусу. [427]

Результати

1. Розрахункова схема колінчастого вала та кінцево-елементний аналіз

На окремому прикладі досліджено динамічний стан колінчастого вала 3LD-1005020 для дизеля ММ3-3LD (рис. 4).

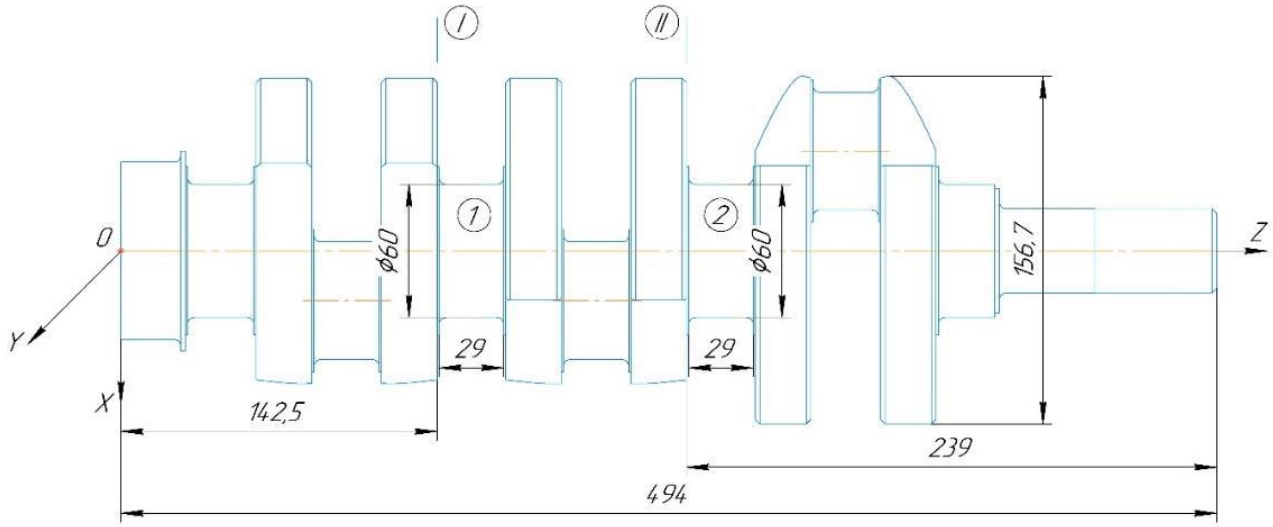


Рисунок 2.16 – Конструктивна схема колінчастого вала 3LD-1005020: 1, 2 – номери цапф; I, II – номери площин корекції

Для проведення чисельних розрахунків були враховані наступні вихідні параметри: матеріал колінчастого вала – сталь DIN 40NiCrMo6; маса валу m0 = 23,3 [кг]; максимальна робоча частота – 4000 [об/хв]; кількість площин корекції n = 2.

Зовнішні шийки вала корінних підшипників були обрані як опорні поверхні. Використовуються як технологічна основа для шліфування шатунних шийок, коли можливі максимальні деформації та вібрації.

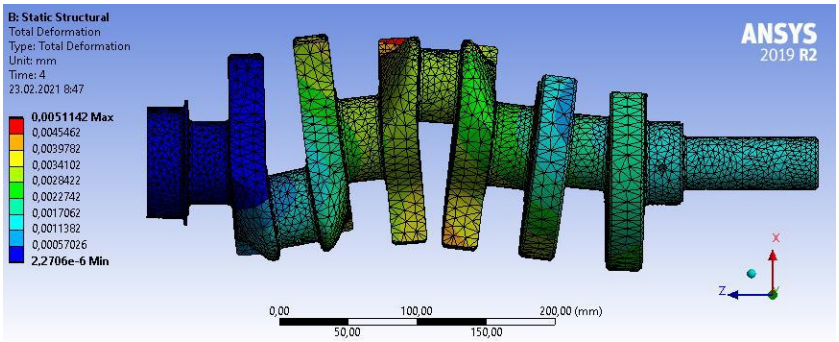
Під час моделювання використовувалося програмне забезпечення ANSYS. З цією метою його модулі «Статична структура» та «Модальний аналіз» були застосовані послідовно. Зокрема, перший спрямований на визначення фактичних значень податливостей α і β в (2.28). Другий застосований для визначення власних частот. Визначено відповідні форми мод для переміщень x і y.

Граничними умовами в цьому випадку є фіксація опорних циліндричних поверхонь в напрямках X і Y і обмеження поворотів навколо цих осей. Колінчастий вал послідовно навантажений на поверхні цапф одиничною силою 1 кН в напрямках X і Y. Сітка була виконана з використанням 6·105 кінцевих тетраедричних елементів з максимальним розміром 5 мм. Загальна кількість нот 1·106. Оскільки щільність сітки для геометричного звуження має бути ущільненою для отримання надійних результатів моделювання, розподіл сітки є навмисно нерівномірним.

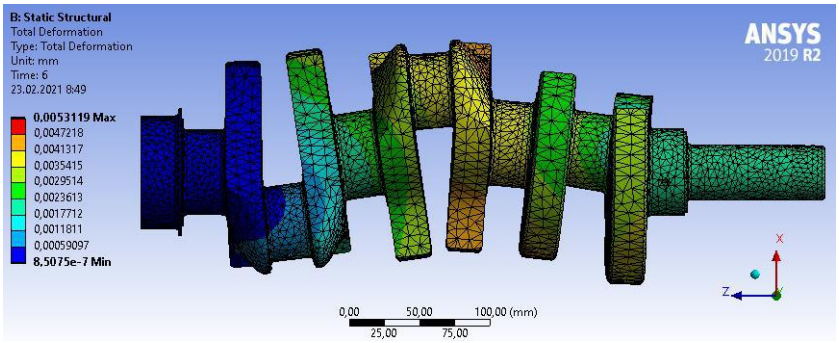
Було реалізовано визначення збіжності сітки, два додаткових розрахунки. Перший розрахунок з крупною сіткою (3,5·105 скінчених тетраедричних елементів) показав, що максимальне значення еквівалентного напруження становить 2,40 МПа. Другий з дрібною сіткою (10·105 кінцевих тетраедричних елементів) дозволяє отримати 2,32 МПа. Різниця між цими значеннями близько 3% свідчить про достатню збіжність сітки.

Результати статичного аналізу конструкції представлені на рис. 2.17.

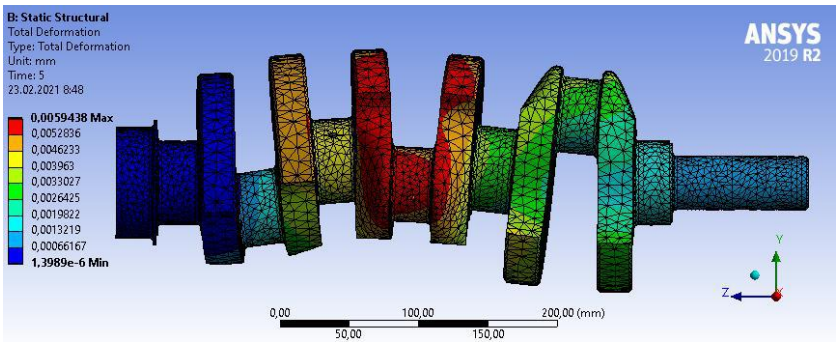
Результати чисельного моделювання статичного структурного аналізу підсумовані в табл. 2.5.



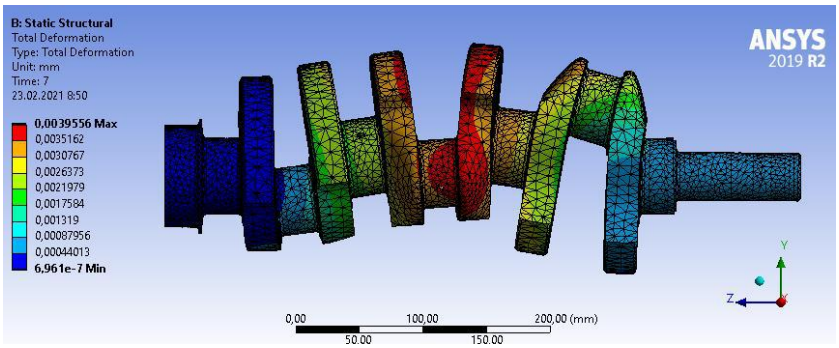
а



б



в



г

Рисунок 2.17 – Результати статичного розрахунку конструкції для одиничних сил, що діють на 1-у (а, б) і 2-у (в, г) цапфи в площинах XZ (а, в) і YZ (б, г)

Таблиця 2.5 – Результати статичного аналізу конструкції для різних номерів цапф підшипників

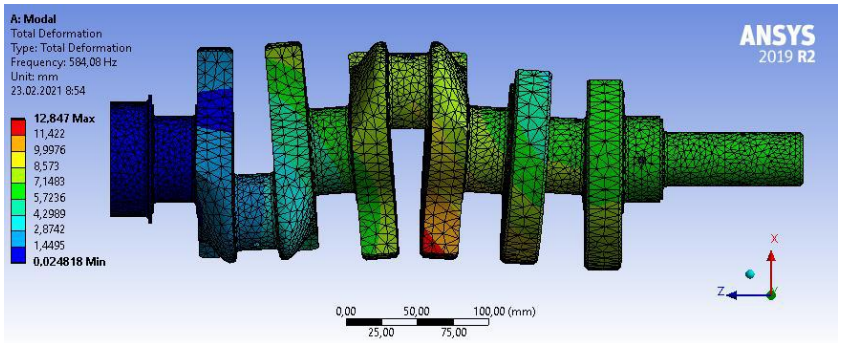
Площина	Прикладена сила, [кН]		Переміщення в плані, [мкм]			
			XZ		YZ	
	1	2	1	2	1	2
XZ	1	–	3,96	2,86	–	–
YZ	–	1	2,79	4,22	–	–
XZ	1	–	–	–	4,53	3,48
YZ	–	1	–	–	2,63	3,34

Ці дані дозволяють визначити матриці відповідності (2.13):

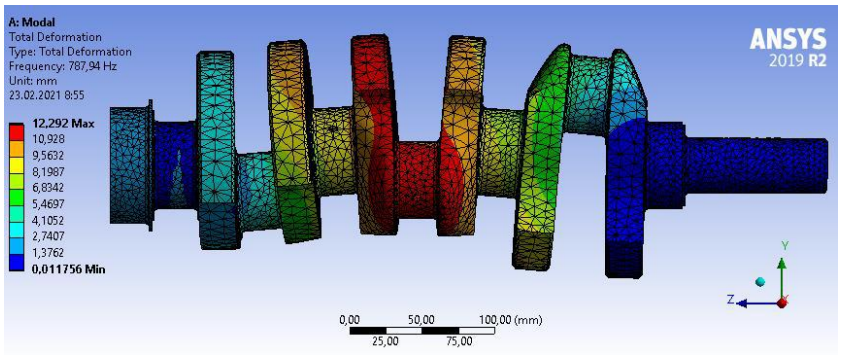
$$[\alpha] = \begin{bmatrix} 3{,}96 & 2{,}86 \\ 2{,}79 & 4{,}22 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6}; [\beta] = \begin{bmatrix} 4{,}53 & 3{,}48 \\ 2{,}63 & 3{,}34 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6}.$$

Досліджуваний колінчастий вал має явні анізотропні властивості щодо його жорсткості на згинання, що видно з елементів цих матриць.

Результати модального аналізу представлені на рис. 2.18.



а



б

Рисунок 2.18 – Результати модального аналізу для власних частот 584 Гц (а) та 788 Гц (б) [427]

Отримані результати відповідають попереднім даним, отриманим за допомогою сертифікованих програм для визначення переміщень і першої

власної частоти, реалізованих за допомогою системи комп'ютерної алгебри MathCAD. Порівняння результатів чисельного моделювання наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.6 – Результати модального аналізу для різних номерів цапф [427]

Власні частоти, [Гц]	Розмірні переміщення на площині			
	XZ		YZ	
	1	2	1	2
584	1	1,42	–	–
788	–	–	1	0,96
1145	1	–1,01	1	–0,90
1477	1	–1,18	1	–1,04

Таблиця 2.7 – Порівняння результатів чисельного моделювання

Джерело	Обчислений параметр		
	Переміщення, мкм		Перша власна частота, Гц
	min	max	
ANSYS	2,63	4,53	584
MathCAD	2,48	4,71	604
Error percentage, %	5,7	4,0	3,4

2. Ідентифікація параметрів дискретно-масової математичної моделі

Ці дані дозволяють визначити нормалізовані вектори-стовпці власних форм вільних коливань

$$\{\xi^{<1>}\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1.42 \end{Bmatrix};\ \{\eta^{<2>}\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0.96 \end{Bmatrix};\ \{\xi^{<3>}\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1.01 \end{Bmatrix};\ \{\eta^{<3>}\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -0.90 \end{Bmatrix};$$

$$\{\xi^{<4>}\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1.18 \end{Bmatrix}\ \{\eta^{<4>}\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1.04 \end{Bmatrix}$$

і локальні матриці та вектори-стовпці (2.21):

$$[A^{<1>}] = \begin{bmatrix} 3{,}96 & 4{,}10 \\ 2{,}79 & 5{,}98 \end{bmatrix} \cdot 10^{-9}; \{X^{<1>}\} = \begin{Bmatrix} 7{,}43 \\ 1{,}05 \end{Bmatrix} \cdot 10^{-8};$$

$$[B^{<2>}] = \begin{bmatrix} 4{,}53 & 3{,}33 \\ 2{,}63 & 3{,}19 \end{bmatrix} \cdot 10^{-9}; \{Y^{<2>}\} = \begin{Bmatrix} 4{,}08 \\ 3{,}90 \end{Bmatrix} \cdot 10^{-8};$$

$$[A^{<3>}] = \begin{bmatrix} 3{,}96 & -2{,}90 \\ 2{,}79 & -4{,}22 \end{bmatrix} \cdot 10^{-9}; \{X^{<3>}\} = \begin{Bmatrix} 1{,}93 \\ -1{,}93 \end{Bmatrix} \cdot 10^{-8};$$

$$[B^{<3>}] = \begin{bmatrix} 4{,}53 & -3{,}13 \\ 2{,}63 & -3{,}00 \end{bmatrix} \cdot 10^{-9}; \{Y^{<3>}\} = \begin{Bmatrix} 1{,}93 \\ -1{,}74 \end{Bmatrix} \cdot 10^{-8};$$

$$[A^{<4>}] = \begin{bmatrix} 3{,}96 & -3{,}42 \\ 2{,}79 & -4{,}99 \end{bmatrix} \cdot 10^{-9}; \{X^{<4>}\} = \begin{Bmatrix} 1{,}16 \\ -1{,}37 \end{Bmatrix} \cdot 10^{-8};$$

$$[B^{<4>}] = \begin{bmatrix} 4{,}53 & -3{,}60 \\ 2{,}63 & -3{,}46 \end{bmatrix} \cdot 10^{-9}; \{Y^{<4>}\} = \begin{Bmatrix} 1{,}16 \\ -1{,}20 \end{Bmatrix} \cdot 10^{-8}.$$

Цей набір даних дозволяє отримати глобальну матрицю жорсткості [CG] і вектор-стовпець [ZG] (3), а також комплексну матрицю [C] і вектор-стовпець {Z}. У результаті виходячи з формули (7). Можна обчислити наступний стовпець-вектор дискретних мас [427]:

$$\{m\} = \begin{Bmatrix} 8{,}79 \\ 8{,}91 \end{Bmatrix}.$$

У цьому випадку сумарна відносна похибка оцінки дискретних мас (8) εm = 0,24. Це значення можна зменшити за допомогою нелінійної ідентифікації параметрів або штучних нейронних мереж. [427]

Застосування формул (2.30) і (2.32) дозволяє оцінити результуючий вектор-стовпець власних частот для дискретно-масової моделі. Зокрема, перші дві власні частоти дорівнюють Ω1 = 620 [Гц] і Ω2 = 640 [Гц].

Оскільки частота обертання колінчастого вала не перевищує 1-у власну частоту, то необхідно оцінити відносну похибку ідентифікації параметра дискретно-масової моделі (2.32), яка дорівнює$\varepsilon_{\omega}^{<1>}$ = 0,06. Таким чином, похибка оцінки 1-ї власної частоти становить близько 6 %, що є прийнятним для двомасової динамічної моделі, оскільки менше похибок розрахунку параметрів c0, b0 тощо за існуючими методами. Також можна показати, що відносна похибка визначення 2-ї власної частоти дискретної двомасової моделі дорівнює 18 %, оскільки ротор працює на частотах, менших за 1-шу власну частоту. Отже,

оскільки максимальна робоча частота менша за 1-шу власну частоту, немає необхідності краще узгоджувати ці власні частоти.

3. Результати чисельного розрахунку дискретно-масової математичної моделі

Для конкретного прикладу були розглянуті наступні значення параметрів: максимальна робоча частота ω0 = 419 рад/с (4000 об/хв); довжина валу 0,496 м; середній радіальний зазор h0 = 0,25·10–3 м; коефіцієнт жорсткості c0 = 2·103 Н/м; коефіцієнт демпфування b0 = 0,8·102 Н·с/м для середньої температури масла 90°C; безрозмірні характеристики γ = 0,5; контактна жорсткість cs = 1·106 Н/м; коефіцієнт тертя μ = 0,12.

У разі контакту між ротором і статором нелінійним тертям можна знехтувати порівняно з контактною силою. Отже, коефіцієнт f = 0. Крім того, не можна враховувати внутрішню в'язку силу (ζ = 0), оскільки вона впливає на початкове статичне переміщення.

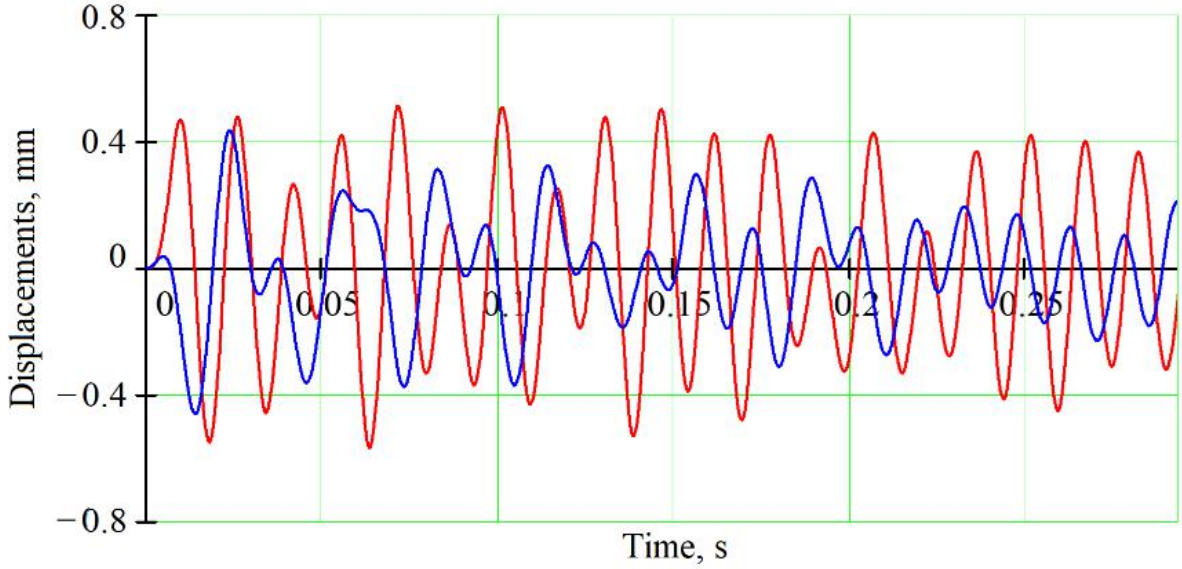
Використовуючи наведені вище дані, дискретні маси m1 = 8,79 кг і m2 = 8,91 кг. Коефіцієнти анізотропної податливості: α11 = 3,96·10–6 м/Н, α12 = 2,86·10–6 м/Н, α21 = 2,79·10–6 м/Н, α22 = 4,22·10–6 м/N; β11 = 4,53·10–6 м/Н, β12 = 3,48·10–6 м/Н, β21 = 2,63·10–6 м/Н, β22 = 3,34·10–6 м/Н.

Відповідно до вимог до якості балансування, наданих ISO 1940-1:2003, клас якості балансування «G100», а допустимий залишковий дисбаланс дорівнює eper = 2,25·10–4 кг·м/кг. При цьому допустимі залишкові дисбаланси D1 = eper·m1 = 1,98·10–4 (кг·м), а D2 = eper·m2 = 2,01·10–4 (кг·м).

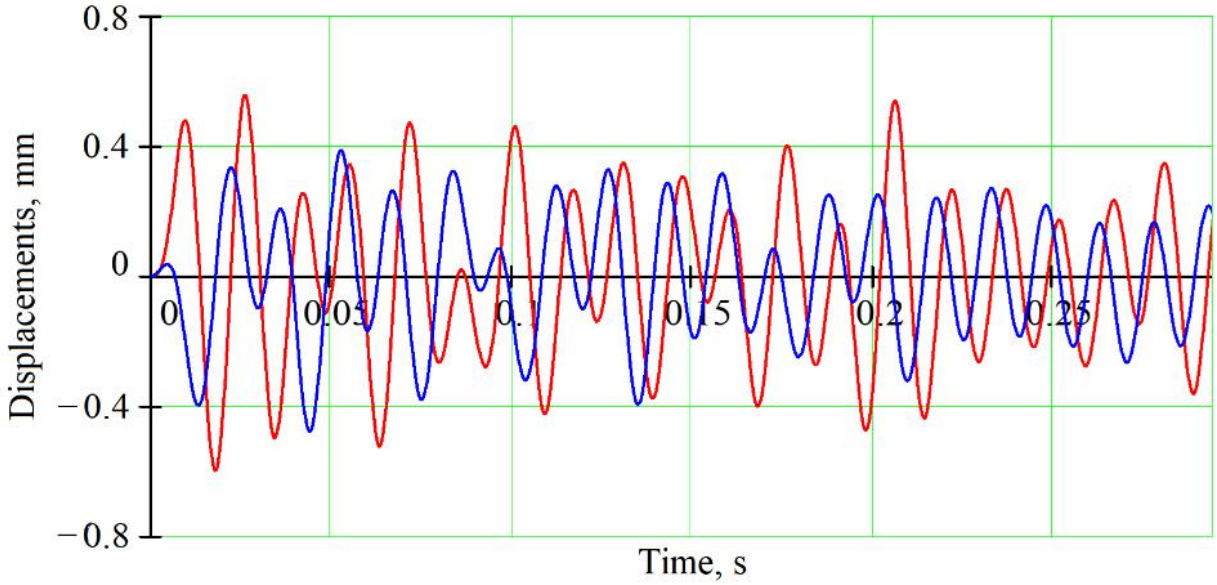
Чисельний розв'язок системи нелінійних диференціальних рівнянь (2.44) реалізовано за допомогою алгоритму Булірша–Штора. Цей підхід включає екстраполяцію Річардсона і модифікований метод середньої точки. Він дозволяє отримати більш точні чисельні розв'язки системи нелінійних диференціальних рівнянь порівняно з традиційним методом Рунге–Кутта 4-го порядку.

Зокрема, для розглянутого прикладу початкові значення переміщень і складових швидкості дорівнюють нулю: $x_{1,2}(0) = y_{1,2}(0) = 0$, а $\dot{x}_{1,2}(0) = \dot{y}_{1,2}(0) = 0$.

В результаті чисельного розрахунку отримано часові характеристики (рис. 2.19) та орбіти шийок колінчастого вала (рис.2.20).

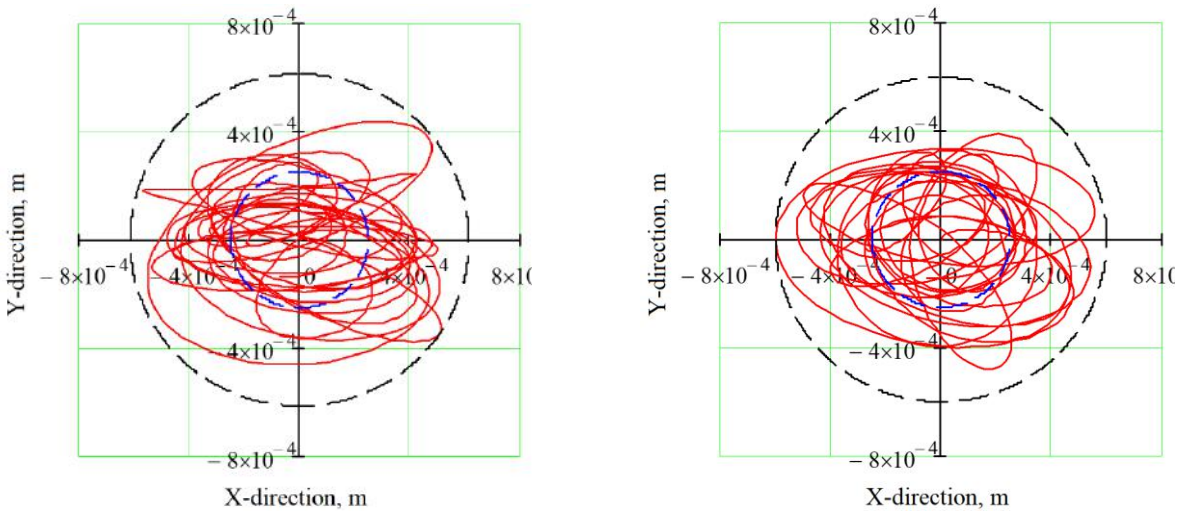


а



б

Рисунок 2.19 – Часові характеристики коливань 1-ї (а) та 2-ї (б) цапф валу в напрямках X (позначено червоним) та Y (позначено синім)



а б

Рисунок 2.20 – Орбіти коливань для 1-ї (а) та 2-ї (б) цапф валу

З рис. 2.19 та 2.20 видно, що максимальне значення розрахункової амплітуди перевищує радіальний зазор між ротором і статором. Це означає, що інтенсивне зношування відбувається при робочій швидкості 4000 об/хв. При цьому сумарне значення зносу шийок валів і втулок корпусу дорівнює ew = 0,37 мм. У результаті середній зазор між ротором і статором повинен бути збільшений з h0 = 0,25 (мм) до h0 +ew = 0,62 (мм).

Для аналізу основних складових динамічних відгуків цапф вала були отримані відповідні спектри (рис. 2.21) шляхом застосування складного швидкого перетворення Фур'є, реалізованого в системі комп'ютерної алгебри MathCAD.

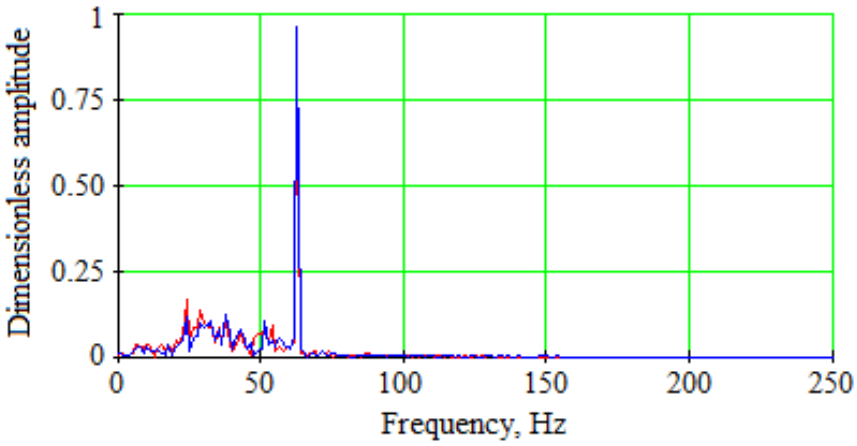


Рисунок 2.21 – Спектри коливань 1-го (позначено червоним) та 2-го (позначено синім) цапф валу

Основна складова спектру на частоті 67 Гц відповідає максимальній робочій швидкості 4000 об/хв.

4. Розрахункова схема вимірювання параметрів колінчастих валів

Як правило, вимірювання радіальних розмірів, похибок форми і биття шийок валів проводять на спеціалізованому стенді. Відповідна розрахункова схема представлена на рис. 2.22.

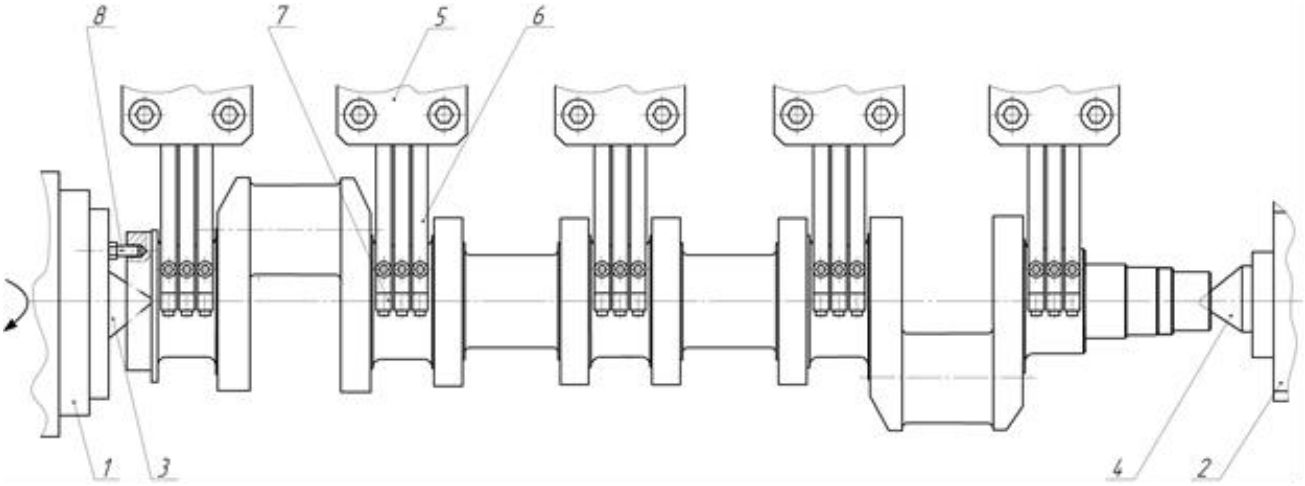


Рисунок 2.22 – Розрахункова схема вимірювання параметрів колінчастих валів: 1, 2 – шпиндельні головки; 3 – нерухомий центр; 4 – рухомий центр; 5 – вимірювальна головка; 6 – мірна скоба; 7 – вимірювальний елемент; 8 – елемент визначення похибок форми

Підставка складається з основи, на якій розташовані шпиндельні головки 1–2 з центрами 3–4. Для забезпечення розташування валу на різні довжини головка 2 переміщується в осьовому напрямку. Головка 1 має привід повороту. Деталь закріплена на центрах 3 і 4 (центр 4 рухомий). Вимірювання розмірів, похибок форми, биття і прогинів проводять за допомогою вимірювальних головок 5, на яких встановлені мірні скоби 6 з елементами 7. Кількість вимірювальних головок відповідає кількості контрольованих шийок валу. Три щупи на кожній вимірювальній голівці дозволяють визначити похибки форми в осьовому напрямку (скошеність, вінець, сідлоподібність). Вал може обертатися на 360° за допомогою елемента 8 для визначення похибок форми в радіальному напрямку (еліптичності та огранювання). В результаті порівняння радіальних

биття для кожної шийки вала дозволяє визначити прогини колінчастого вала у відповідному поперечному перерізі.

Технологічні вимоги наступні. По-перше, вигин колінчастого вала визначається биттям його корінних шийок, що вказує як на похибки форми, так і на можливий прогин вала. Після обробки шийок за необхідними розмірами биттям визначають неспіввісність геометричних осей колінчастого вала. Зокрема, непаралельність твірної шатунної шийки відносно осі вала ер допускається не більше 0,02 мм на 100 мм довжини вала. Максимальне значення допустимого биття корінних цапф відносно осі вала приблизно дорівнює eb = 0,06 мм. Крім того, осі головних цапф повинні відповідати одній прямій. Осі допоміжних цапф повинні бути паралельні загальній осі головних цапф. Осі допоміжних цапф повинні бути на однаковій відстані від осей головних цапф. Нарешті, відхилення розмірів для шийок валів не повинно перевищувати Δdper = 0,5 мм.

Відповідно до цих вимог відносну похибку можна оцінити наступним чином:

$$\varepsilon_{max} = \left| \frac{e_w + e_p + e_b}{\Delta d_{per}} - 1 \right| \cdot 100\ \%. \qquad (2.46)$$

На окремому прикладі колінчастого вала 3LD-1005020 для дизеля ММ3-3LD коефіцієнт зносу e_w = 0,37 мм, а допустимі похибки e_p = 0,02·0,496/0,1 = 0,1 (мм) і e_b = 0,06 мм. Таким чином, виміряний знос відповідає різниці 0,35 мм між оціненою амплітудою коливань 0,60 мм (рис. 2.20) і радіальним зазором h_0 = 0,25 мм з відносною похибкою 5,8 %.

Таким чином, запропонований підхід до параметричної ідентифікації дискретних мас дозволив створити узагальнену дискретно-масову математичну модель вільних і вимушених коливань ротора. У цій моделі враховуються нелінійні сили різної природи (сила інерції Даламбера, відцентрова сила інерції, сили демпфування і нелінійного тертя, сили циркуляції і внутрішнього тертя, а також сила можливої контактної взаємодії між ротором і статором).). Ця модель

розширює можливості дослідження вільних і вимушених коливань роторних систем завдяки наступним принциповим причинам. По-перше, модель дискретна, тому її маси зосереджені в площинах корекції. У цьому випадку дискретні маси оцінюються за умовою відповідності власних частот дискретно-масової та скінченно-елементної моделей, навіть за формами мод у площинах різної жорсткості. Крім того, розроблений підхід удосконалює запропоновану математичну модель у міру появи інших сил, що впливають на динаміку ротора (тобто умови запалювання). Крім того, запропонована модель дозволить розглядати інші моделі сил внутрішнього тертя або дефектів іншої природи (наприклад, знос шийок вала та втулок корпусу, дефекти форми).

Суттєвою перевагою запропонованого підходу є відсутність додаткових розв’язуваних дослідницьких задач методом FEA/CDF, таких як моделювання складних гідродинамічних процесів з динамікою ротора в гідродинамічному середовищі

2.2 Методика прогнозування ресурсу вузлів енергетичного обладнання під дією динамічних навантажень

2.2.1 Універсальний експериментальний стенд для дослідження динаміки роторних систем

На сьогоднішній день існують математичні моделі динаміки роторних систем у підшипникових опорах, які дозволяють ураховувати фактори впливу різної природи. Наприклад, удосконалено модель, Що дозволяє досліджувати динаміку ротора з урахуванням впливу Частоти обертання, попереднього осьового навантаження, зазори між тілами кочення і обоймами на радіальну жорсткість. На прикладі цієї моделі також створено біль досконалі моделі динаміки роторних систем, які ураховують нелінійні складові сил, що діють на опори і ущільнення. Підтвердження достовірності уточнених моделей роторних систем потребує розроблення та виготовлення універсального переналагоджуваного експериментального стенда, який би дозволив проводити

експериментальні дослідження у широкому діапазоні зміни геометричних і фізичних параметрів системи «ротор - підшипникові опори». [491]

З цією метою було створено стенд (рис. 2.23), що дозволяє змінювати геометрію ротора, досліджувати різні типи підшипникових опор, змінюючи їх кількість і типорозміри, а також досліджувати вплив різних типів муфт. [491]

Все це дає можливість проводити експериментальні дослідження ротора як з одним, так і з декількома прольотами, а також консольного ротора, моделювати несоосність, перекос та інші дефекти, а також варіювати кількістю площин корекції для реалізації процедури балансування. [491]

Рисунок 2.23 – Універсальний експериментальний стенд для дослідження динаміки роторних систем

2.2.2 Дослідження відкритих, напіввідкритих та комбінованих контрроторних ступенів

На сьогодні в різних галузях промисловості широко розповсюджені відцентрові консольні насоси. Такі насоси повністю досліджені та мають найоптимальніші значення напору та ККД, які тільки можливо досягти. Новою віткою в насособудуванні з’являється консольний контрроторний відцентровий насос. [492]

Новий насос має змінену проточну частину та інший принцип дії передачі енергії від робочих органів рідині. Робоче колесо в такому насосі обертається за

годинниковою стрілкою, а лопатевий диск обертається проти годинникової стрілки. За рахунок цього між дисками з'являється контрроторний ефект, який в свою чергу передає рідині значно більше енергії ніж звичайні відцентрові насоси. [492]

У зв'язку із змінами швидкостей насос може створювати значно більший напір. А це в свою чергу веде до підвищення об'ємних втрат, які виникають в області між покривним диском та корпусом насоса. Використовуючи щілинне ущільнення можливо тільки зменшити об'ємні втрати, а не повністю їх виключити. Але є варіант дослідити контр роторний ступінь з різними типами робочих коліс для виключення об'ємних втрат.

Основною перевагою напіввідкритих і відкритих робочих коліс є відсутність втрат, викликаних тертям зовнішніх поверхонь дисків і рідини в корпусі насоса, а також відсутність об'ємних втрат між корпусом насоса та покривним диском. Але при використанні таких робочих коліс є місце зниженню ККД. Міжлопатеві канали в цьому разі утворюють лопаті й стінки корпуса (рис. 2.24). У відцентрових насосах здебільшого застосовують закриті робочі колеса [493].

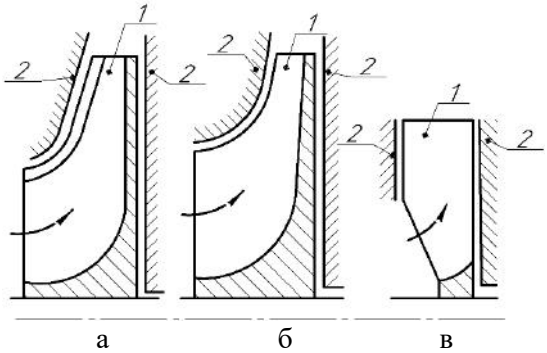
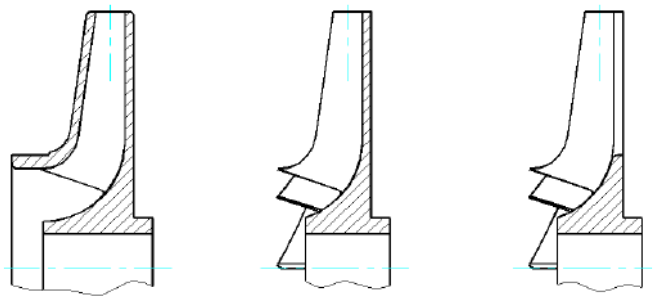


Рисунок 2.24 – Схематичне зображення проточної частини з робочими колесами різного типу: а – закрите робоче колесо; б – напіввідкрите робоче колесо; в – відкрите робоче колесо; 1 – лопать; 2 – корпус насоса

На разі робочі колеса за конструкцією дисків поділяються на закриті (рис. 2.25а), напіввідкриті (без покривного диска, рис. 2.25б) і відкриті (без покривного диска і частини основного диска, рис. 2.25в). Вибір типу робочого колеса залежить від призначення насоса і його робочих параметрів. За

конструктивним оформленням робочі колеса закриті (рис. 2.25 а), мають передній (покривний) і задній (основний) диски, напіввідкриті (рис. 2.25 б), у яких відсутній покривний диск і лопаті кріпляться лише до основного диска, і відкриті (рис 2.25в), які мають втулки із закріпленими на ній лопатями [492].



а б в

Рисунок 2.25 – Типи робочих коліс залежно від конструкції дисків:
а – відкрите; б – напіввідкрите; в – закрите

Як працює контр роторний ефект. Для зручності сприйняття решітки були рознесені на відстань «а» (рис. 2.26). Вектори швидкостей і їхні складові подані для вісесиметричної схеми течії й умови $\omega I = -\omega II$ (решітки обертаються в протилежних напрямках з однаковою кутовою швидкістю). Крім того, на вході в кожну решітку обрані умови безциркуляційного натікання. Водночас варто зазначити, що якщо для першої решітки цю умову ($\upsilon u1=0$) нескладно забезпечити завдяки конструкції підвода, то забезпечити умову $\upsilon u3=0$ на вході в другу решітку буде значно складніше. Домогтися цього можна тільки завдяки відповідній комбінації геометричних і кінематичних параметрів як першої, так і другої решіток [494, 495].

Рідина на вході в другу решітку течія, що вийшла з першої, має значний момент імпульсу (закрутку), створений першою решіткою ($\upsilon u2 \cdot r2$). Водночас його напрям протилежний напрямку обертання другої решітки. І хоча вектор $\upsilon 3$ закрутки не створює ($\upsilon u3=0$), закрутка $\upsilon u2 \cdot r2$ є реальною негативною циркуляцією на вході в другу решітку [493, 494].

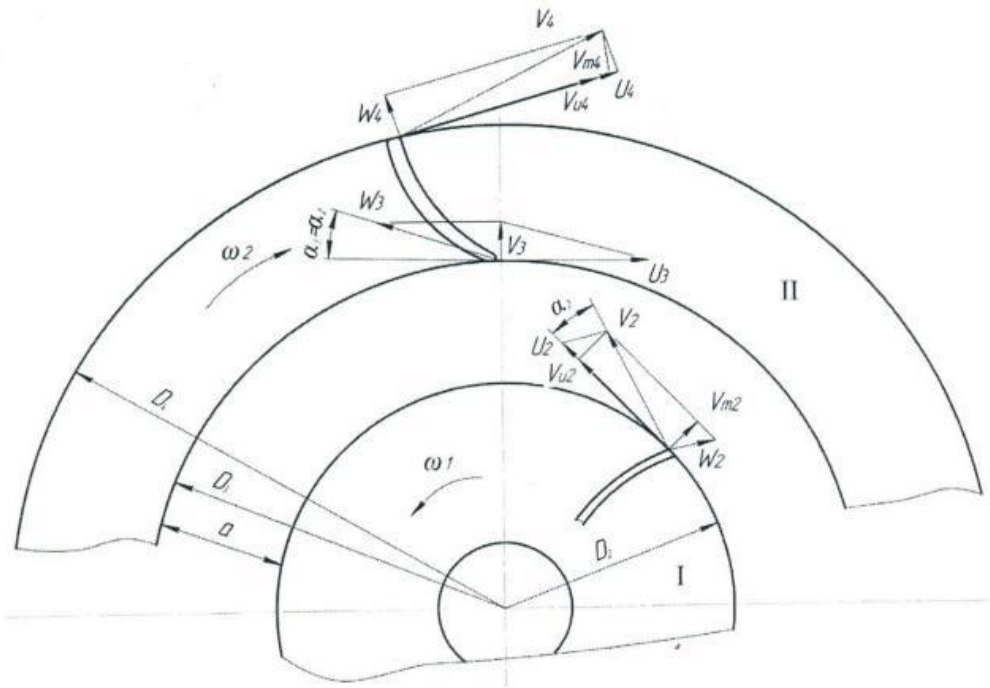


Рисунок 2.26 – Кінематика течії в контрроторних відцентрових решітках [496]

Варто також звернути увагу на те, що лопаті другої решітки рухаються назустріч течії, що виходить із першої решітки, змінюючи її момент імпульсу за дуже короткий час. А це згідно з теоремою імпульсів зумовлює різке зростання сили взаємодії між твердою поверхнею лопаті і течією, що на неї набігає. Це, очевидно, призводить до суттєвого зростання інтенсивності процесу енергопередачі. Розглядаючи робочий процес контрроторної лопатевої системи і насамперед роботу другої решітки, виникає припущення, що перша решітка, створюючи на вході в другу течію зі значною негативною циркуляцією $\Gamma 2$, забезпечує тим самим інтенсивну зустрічну течію для лопатей другого ротора, з якими вони активно взаємодіють. Очевидно, що кінетична енергія цієї течії швидко переходить у стан енергії тиску, що нагадує робочий процес у гідромашинах активного принципу дії (наприклад, у струменевих ковшових турбінах) [494]. А це значить, що при збільшенні тиску буде збільшуватись і обємні втрати. На рис. 2.27 показана течія рідини та об’ємні втрати в двох контр роторних ступенях. Перша ступінь (рис. 2.27а) має покривні диски, а на другій (рис. 2.27б) – вони відсутні. Тим самим об’ємні втрати можемо спостерігати тільки на рис. 2.27а. [496]

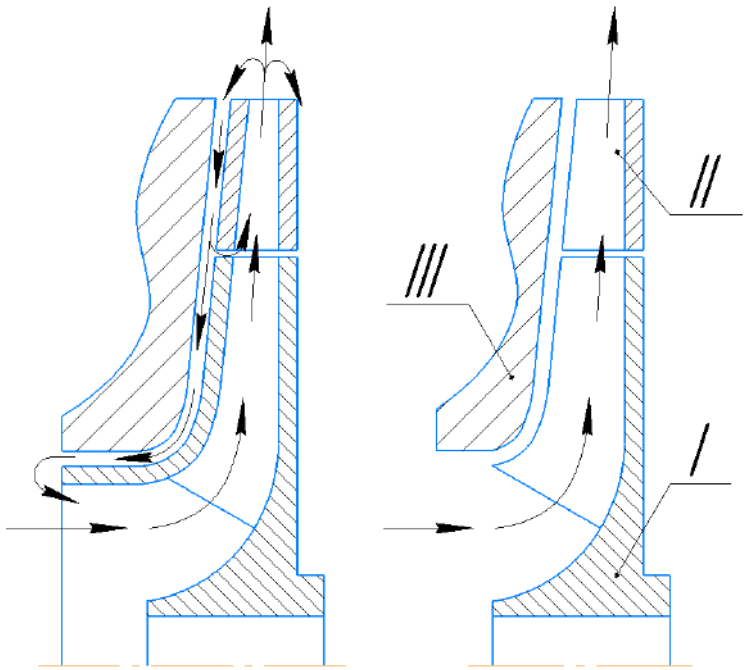


Рисунок 2.27 – Об’ємні втрати у контр роторних ступенях:

а – закритого типу, б – напіввідкритого типу

1. Методика проектування

Об’єктом дослідження є контрроторона ступінь з базовим робочим колесом насоса ЦНС-180/1900. Для дослідження були створені такі контр роторні ступені з метою зменшення об’ємних втрат. Контрроторні ступені мають робоче колесо (рис. 2.28 (I)) та лопатевий диск (рис. 2.28 (II)). Для розрахунків були створені наступні ступені: закрите колесо з закритим диском (рис. 2.28а); напіввідкрите колесо з напіввідкритим диском (рис. 2.28б); закрите колесо з напіввідкритим диском (рис. 2.28в); напіввідкрите колесо з закритим диском (рис 2.28г). В своєму складі кожна із ступенів мала робоче колесо з вісьмома лопатями. Відмінною характеристикою таких ступенів були наявність покривного диску та кількість лопатей в лопатевому диску, які в свою чергу дорівнювали 8, 10, 12 шт.

На початку були розраховані лопаті контрроторних ступенів (рис. 2.29а) з оптимальними кутами атаки 90 та виходу 120. За допомогою програмного продукту Solid Works (рис. 2.29б) були створені 3Dмоделі проточних частин різних лопатевих дисків та робочих коліс.

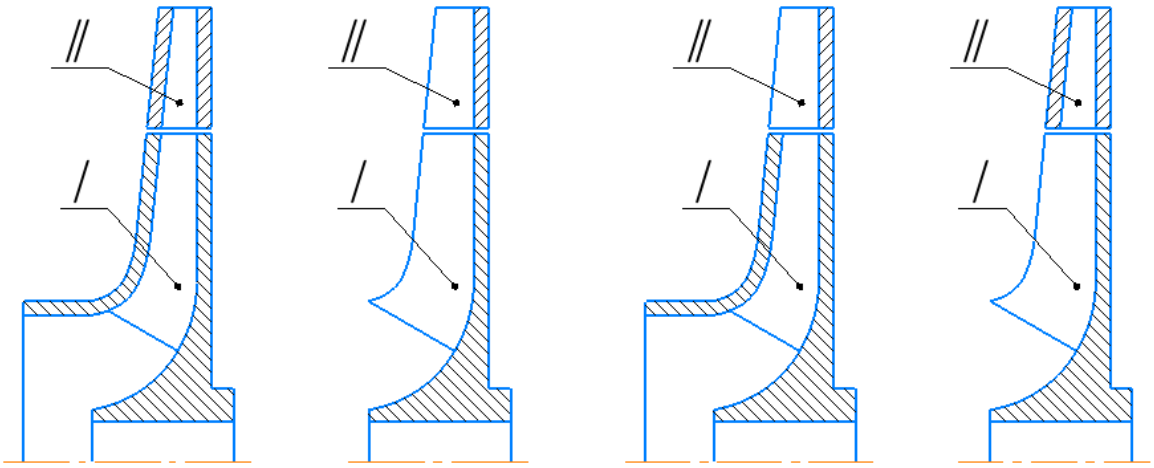
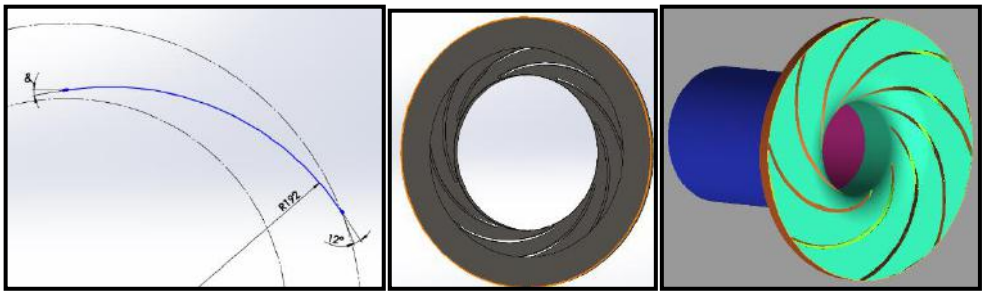


Рисунок 2.28 – Контр роторні ступені: напіввідкрите колесо з напіввідкритим диском; закрите колесо з закритим диском; напіввідкрите колесо з закритим диском; закрите колесо з напіввідкритим диском

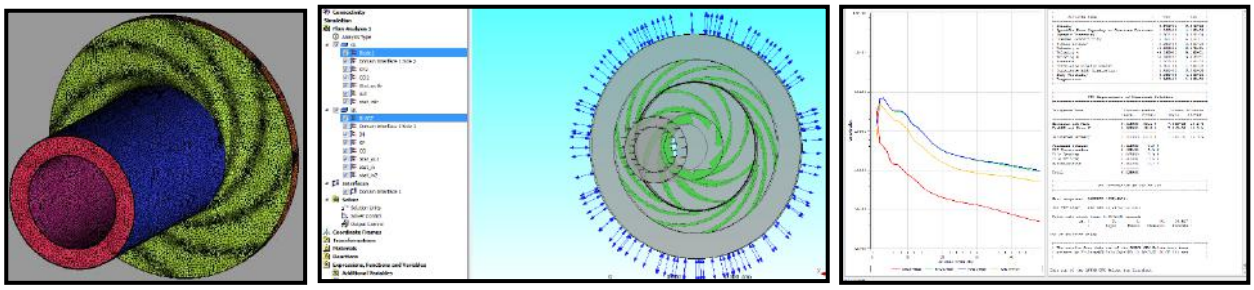
За допомогою програми ANSYS CFX створені моделі були розбиті на поверхні (рис. 2.29в) та створені розрахункової сітки (рис. 2.29г). Наступним етапом для кожної моделі були задані умови входу, виходу, налаштування перекачуваного середовища та задавання конкретних приграничних умов (рис. 2.29д). Після чого проводився чисельний розрахунок контр роторних ступенів (рис. 2.29е).

В основу даного програмного продукту ANSYS CFX закладений метод чисельного вирішення фундаментальних законів гідромеханіки [497, 498]: рівнянь руху в'язкої рідини спільно з рівнянням нерозривності. Це є достатньою умовою обґрунтованості застосування результатів чисельного дослідження. Слід зазначити, що ANSYS CFX неодноразово випробувався при вирішенні задач насособудування, розбіжність результатів чисельного і фізичного моделювання не перевищує 5%, тому даний програмний продукт придатний для вирішення поставленого завдання дослідження. [496]

В результаті досліджень отримані течії рідини в контр роторних ступенях та їх характеристики у вигляді напору та ККД (табл. 2.7).



а б в



г д е

Рисунок 2.29 – етапи виконання досліджень: а – розрахунок лопатей, б – створення 3Dмоделей, в – розбиття поверхонь, г – створення сітки, д – задання граничних умов, е – проведення чисельного розрахунку

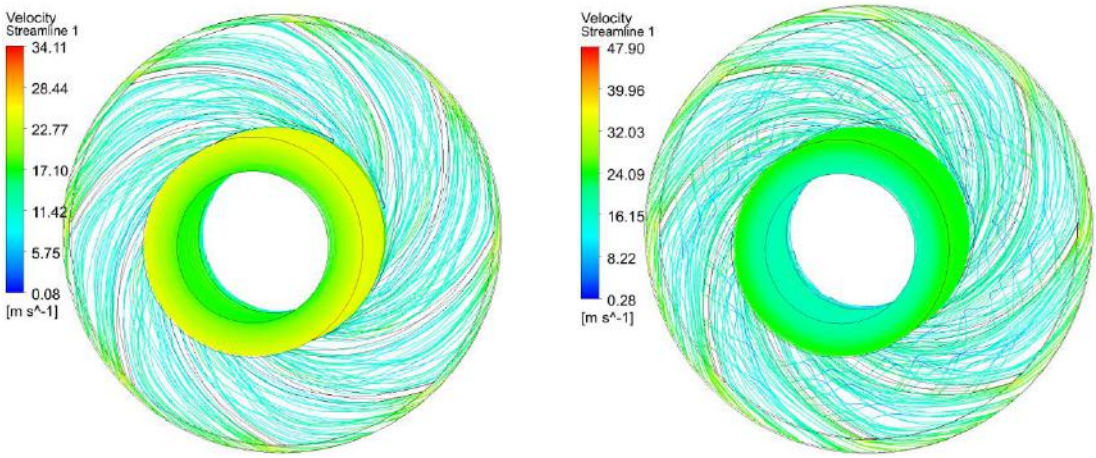
Результати досліджень

Для початку були розраховані базові робочі колеса без лопатевих дисків (рис. 2.30). Для наглядності і порівняння характеристик з контрроторними ступенями були отримані характеристики закритого та напіввідкритого робочого колеса.

Закрите робоче колесо (рис. 2.30а) має наступні параметри: напір (Н) – 149,43 м., ККД (%) – 0,95.

Напіввідкрите робоче колесо (рис. 2.30б) має наступні параметри: напір (Н) – 112,86 м., ККД (%) – 0,76.

Потік рідини в закритому колесі стабільний, відсутні завихрення. Максимальна швидкість потоку – 19,3 м/с. Щодо напіввідкритого робочого колеса, то можемо побачити перетікання рідини в між лопатевих каналах, що веде до вихроутворень та зниженню ККД. Максимальна швидкість потоку - 26,6 м/с. Окрім перетікання рідини між корпусом та лопатями, сам потік також стабільний.



а б

Рисунок 2.30 – Робочі колеса: а – закрите, б – напіввідкрите

Для дослідження характеристик ступенів було створено ряд лопатевих дисків та робочих колес. Закриті та напіввідкриті контр роторні ступені з однаковою кількістю лопатей порівнювались між собою.

Порівняння перше

Параметри закритого ступеня з 8-ю лопатями (рис. 2.30а): напір (Н) – 382 м., ККД (%) – 0,56.

Параметри напіввідкритого ступеня з 8-ю лопатями (рис. 2.30 б): напір (Н) – 227,72 м., ККД (%) – 0,31.

Порівняння друге

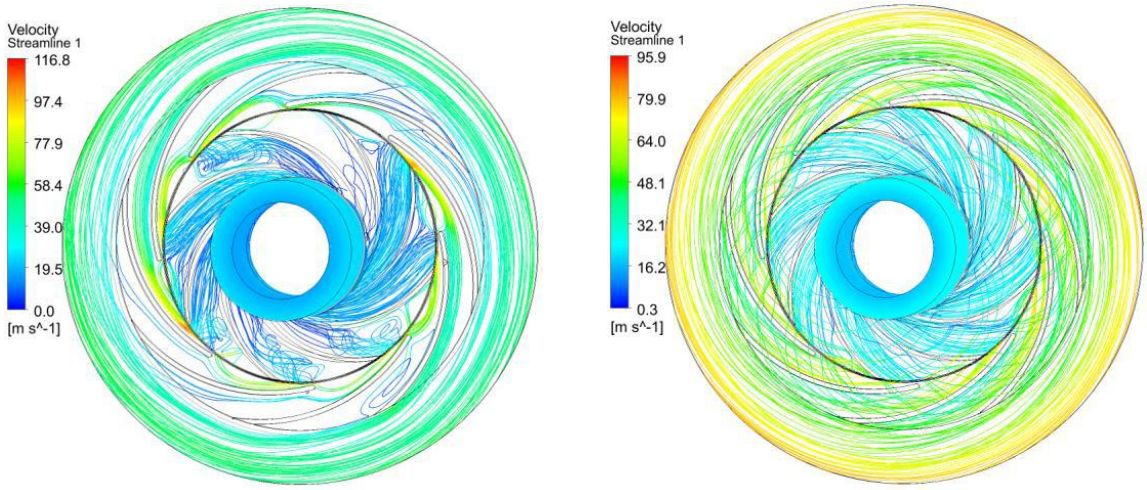
Параметри закритого ступеня з 10-ю лопатями (рис. 2.31 а): напір (Н) – 356,6 м., ККД (%) – 0,55.

Параметри напіввідкритого ступеня з 10-ю лопатями (рис. 2.31 б): напір (Н) – 231,4 м., ККД (%) – 0,31.

Порівняння третє

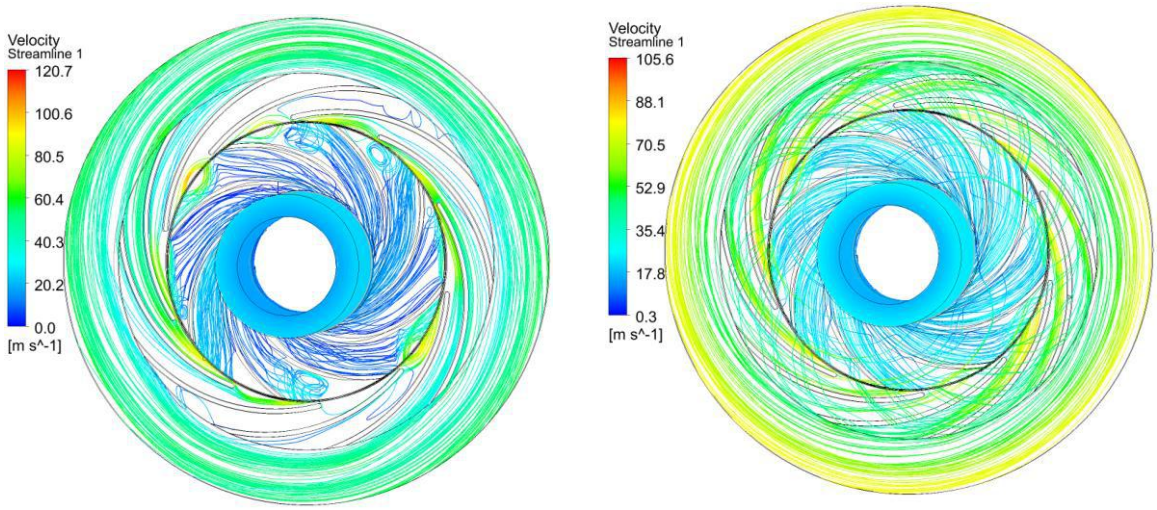
Параметри закритого ступеня з 12-ю лопатями (рис. 2.32 а): напір (Н) – 364 м., ККД (%) – 0,55.

Параметри напіввідкритого ступеня з 12-ю лопатями (рис. 2.32 б): напір (Н) – 224,6 м., ККД (%) – 0,33.



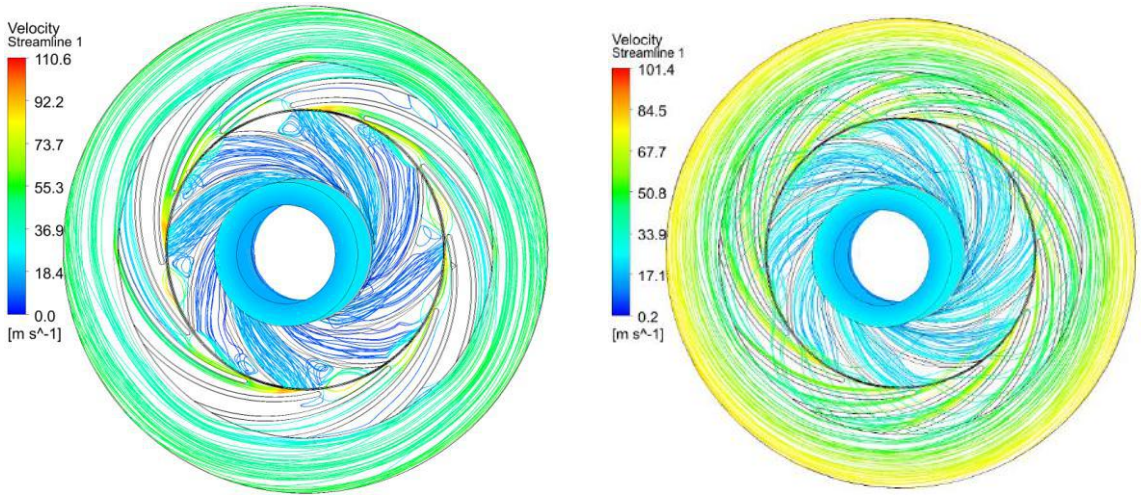
а б

Рисунок 2.31 – Робочі колеса z=8: а – закрите, б – напіввідкрите



а б

Рисунок 2.32 – Робочі колеса z=8: а – закрите, б – напіввідкрите



а б

Рисунок 2.33 – Робочі колеса z=8: а – закрите, б – напіввідкрите

Після отриманих результатів було запропоноване рішення скомбінувати робочі колеса та лопатеві диски різного виконання (рис. 2.34 та 2.35). Отримати їх напірні та енергетичні характеристики та подивитися на взаємодію між собою різних елементів ступеню. Для цього дослідження було взято дві ступені з кількістю лопатей 10 та 12 відповідно.

Перше дослідження з комбінованими елементами

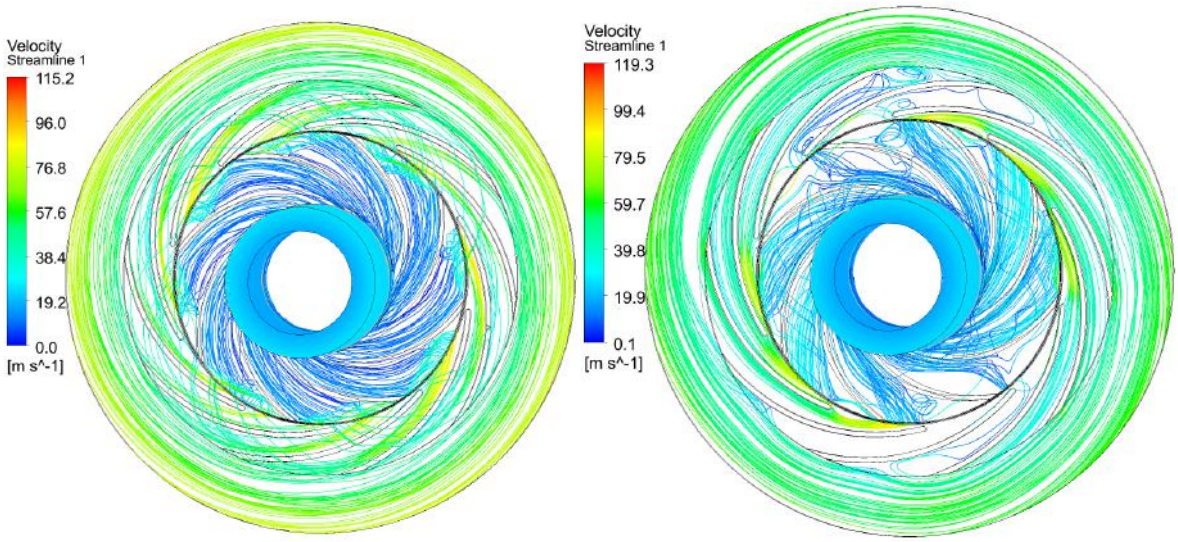
Параметри ступеня з 10-ю лопатями (рис. 2.34 а). Робоче колесо закрите, контрроторний диск напіввідкритий: напір (Н) – 285,5 м., ККД (%) – 0,36.

Параметри напіввідкритого ступеня з 10-ю лопатями (рис. 2.34 б). Робоче колесо напіввідкрите, контрроторний диск закритий: напір (Н) – 319 м., ККД (%) – 0,45.

Друге дослідження з комбінованими елементами

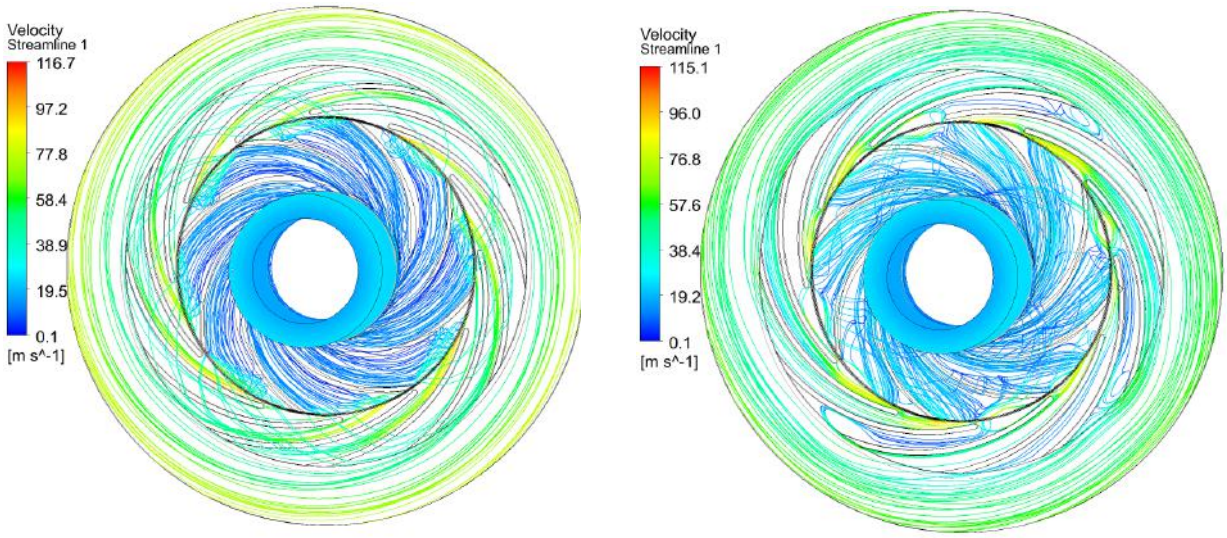
Параметри закритого ступеня з 12-ю лопатями (рис. 2.35 а). Робоче колесо закрите, контрроторний диск напіввідкритий: напір (Н) – 255,7 м., ККД (%) – 0,37.

Параметри напіввідкритого ступеня з 12-ю лопатями (рис. 2.35 б). Робоче колесо напіввідкрите, контрроторний диск закритий: напір (Н) – 328 м., ККД (%) – 0,47.



а б

Рисунок 2.34 – Робочі колеса z=10: а – Робоче колесо закрите, контрроторний диск напіввідкритий, б – Робоче колесо напіввідкрите, контрроторний диск закритий



а б

Рисунок 2.35 – Робочі колеса z=12: а – Робоче колесо закрите, контрроторний диск напіввідкритий, б – Робоче колесо напіввідкрите, контрроторний диск закритий

Обговорення

Як можемо побачити з результатів, течія рідини у закритих ступенях має вихроутворення (рис. 2.24а, 2.25а, 2.26а). Це все призводить до зниженню ККД. У напіввідкритих ступенях все значно краще (рис. 2.24б, 2.25б, 2.26б). Течія рідини має сталий характер, але існує перетікання рідини з одного між лопатевого каналу до іншого.

Отримавши характеристики контрроторних ступенів можемо сказати, що вони мають більші напірні характеристики в порівнянні із базовими робочими колесами, хоча поступаються їм в ККД. В порівнянні напіввідкритих та закритих ступенів не враховуючи кількість лопатів, напіввідкрита ступінь має гірші характеристики ніж закрита. В порівнянні окремо закритих та напіввідкритих ступенів між собою бачимо, що напір та ККД з такою формою лопаті практично не змінюється. Хоча найбільший напір в закритих ступенях досягається завдяки ступеню, що має вісім лопатей.

Щодо комбінованих робочих колес з лопатевими дисками, то при системі напіввідкритого робочого колеса та закритого лопатевого диску (рис.11б, 12б)

ми отримали значно кращі характеристики ніж у порівнянні з закритим колесом та напіввідкритим диском (рис. 2.27а, 2.28а).

Таблиця 2.8 – Характеристики контр роторних ступенів різного виконання

Кількість лопатей, Z.	**Характеристики ступенів, Н м., ККД %.**			
	КР н/ відкр. РК н/ відкр.	**КР закр. РК закр.**	**КР закр. РК н/ відкр.**	**КР н/відкр. РК закр.**
8	Н – 227,72 м ККД – 0,31 %	Н – 382 м ККД – 0,56 %		
10	Н – 231,4 м ККД – 0,31 %	Н – 365,5 м ККД – 0,55 %	Н – 319 м ККД – 0,45%	Н – 258,5 м ККД – 0,36 %
12	Н – 224,6 м ККД – 0,325 %	Н – 364 м ККД – 0,55 %	Н – 328 м ККД – 0,47 %	Н – 255,7 м ККД – 0,37%

Порівнюючи повністю закриту ступінь зі ступеню де відкрите робоче колесо та закритий лопатевий диск, можемо сказати, що напір та ККД знизився, але завдяки цьому ми прибрали об’ємні втрати. Такі гарні напірні характеристики можна пояснити тим, що закритий лопатевий диск являється одночасно й напрямним апаратом для рідини після напіввідкритого робочого колеса. Рідина в диску не перетікає в між лопатевих каналах, й відбувається формування течії на виході.

В результаті досліджень було виявлено, що для отримання найбільшого напору краще застосовувати закриті ступені. Повністю напіввідкриті ступені мають найгірші характеристики. Зазвичай такі колеса використовують для рідини з твердими домішками, але як це вплине на роботу контр роторного ступеню невідомо. Такі ступені краще використовувати для чистої рідини без домішок. Використання комбінованого ступеню для запобігання об’ємних втрат не виправдали своїх очікувань. Об’ємні втрати значно менші ніж втрати на ККД та напір, а отже ними можна знехтувати.

В цій області є багато недосліджених факторів, які впливають на характер течії, напірні та енергетичні характеристики контр роторних ступенів. Дослідження в цій області тільки розпочинаються, та мають місце бути в подальших розрахунках ступенів.

2.2.3 Підвищення ефективності роботи конденсаційних установок парових турбін шляхом застосування рідинно-парових ежекторів

Однією з основних проблем, яка зараз вирішується світовою енергетикою, є її екологічна безпека, яка має забезпечуватися при збереженні необхідних потужностей при все більш зростаючих споживачах енергії. Одним з виходів є перехід на децентралізовані установки малої потужності, але це стосується лише нових систем, які будуть побудовані відповідно до нових вимог та стандартів. Що стосується існуючих установок, то за останні роки основною стратегією їх модернізації та приведення під існуючі Європейські та світові стандарти є оснащення їх газотурбінними та паротурбінними установками малої потужності. Ці установки мають особливі конструкції основного і допоміжного устаткування, режими роботи і управління. Такі установки на природному газі є єдиними енергетичними установками, які в конденсаційному режимі роботи виробляють електроенергію з електричною ефективністю більше 58 %. [499]

Одним із основних способів досягнення високої термічної ефективності паротурбінної установки є зменшення режимних параметрів пари за турбіною. Зі зниженням тиску і температури пари, відпрацьованої в турбіні, зменшується кількість теплоти, що передається холодному джерелу. При постійних параметрах свіжа пара підвищує потужність турбіни і збільшує ефективність циклу в цілому за рахунок збільшення теплоперепаду в турбіні.

Зниження параметрів пари за турбіною зазвичай здійснюється до тиску, нижче атмосферного. Виникає необхідність забезпечення якомога кращої конденсації пари, відпрацьованої в турбіні. Саме тому паротурбінна установка обладнана конденсаційною установкою, яка, крім основного призначення, забезпечує також отримання чистого конденсату для живлення парового котла (парогенератора), замикаючи цикл. [499]

У сучасних конденсаційних установках для відкачування пароповітряної суміші використовуються багатоступеневі пароежекторні агрегати на базі

пароструминних ежекторів, з цілим рядом недоліків, що суттєво знижують їх ефективність.

Досліджуване питання є актуальним з точки зору наукової проблематики для модернізації існуючих систем енергопостачання. Зокрема, необхідно мати існуючі джерела енергії, поки будуються нові енергоощадні установки нового покоління. З метою оцінювання очікуваного ефекту від їх модернізації, необхідно провести порівняльний аналіз пропонованих схем з існуючими та вибрати найкращі з них.

Існуючі конденсаційні системи, які є невід'ємною складовою паротурбінних установок, побудовані на основі пароструминних ежекторів. У роботах [500, 501] виявлено основні переваги та недоліки, серед яких можливість роботи лише в вузькому діапазоні робочих параметрів. Також в цих роботах відзначено, що майже за 50-річний період експлуатації в таких установках вони не були сильно вдосконалені. В роботі [502] описуються основні вдосконалення, які були проведені оптимізації проточної частини та визначення конкретного розрахункового режиму для кожного випадку роботи ежектора.

Автори робіт [503, 504] провели теоретичні та практичні дослідження, які показали, що максимальна ефективність пароструминних ежекторів вже досягнута та не може бути збільшена. У роботі [505] відзначається, що для покращення процесу конденсації в парогазових установках, необхідно виконати пошук нових, альтернативних апаратів, які були б ефективніші та економічніші, порівняно з пароструминними. Є багато спроб це зробити, але всі вони дають змогу збільшити ефективність процесу конденсації на кілька відсотків, порівняно з пароструминними. Автори робіт [506, 507] провели дослідження принципово нового класу апаратів, якими є двофазні струминні апарати та виявили їх основні переваги порівняно з пароструминними ежекторами.

Автори роботи [508] пропонують використовувати рідинно-паровий ежектор у складі вакуумного агрегату, який працює за принципом струминної термокомпресії. Цей принцип полягає в тому, що робочий струмінь пари формується безпосередньо в соплі активного потоку і не потребує додаткового джерела котельної пари, як для пароструминних ежекторів. Котельна пара для

рідинно-парового ежектора необхідна лише у теплообміннику-підігрівачі, яде відбувається нагрівання робочого середовища активного потоку. Але її витрата є в десятки разів меншою, порівняно з пароструминними ежекторами. Також, його основною перевагою є одноступенева конструкція, в той час як пароструминні ежектори є багатоступеневими. Саме це є основною причиною їх низької ефективності.

Як робоча речовина активного потоку в рідинно-паровому ежекторі використовується вода, яка є доступним та дешевим теплоносієм. Можливість застосування води в двофазних струминних апаратах досліджувалася на прикладі холодильних та теплонасосних систем авторами роботи [509]. Так як режими роботи цих установок подібні до конденсаційної системи паротурбінної утсановки, то можна зробити висновок, що і в цьому випадку застосування води є перспективним. Також це вносить суттєвий вклад у економічність пропонованої схеми.

Узагальнюючи аналіз наведених вище джерел, можна зробити висновок, що існуючі конденсаційні системи парових турбін оснащені низькоефективними багатоступеневими пароструминними агрегатами. Це суттєво знижує ефективність конденсаційних систем в цілому та потребує суттєвого доопрацювання.

Одним із можливих шляхів створення високоефективної конденсаційної системи на базі рідинно-парового ежектора є його поєднання з рідинно-кільцевим вакуумним насосом. В цьому випадку рідинно-паровий ежектор буде працювати як форвакуумний агрегат. Основною відмінністю від традиційної схеми є відсутність двоступеневого пароструминного ежектора та дослідження роботи рідинно-парового ежектора у форвакуумному режимі роботи.

Матеріали та методи дослідження

Розглянуто модернізовану парогазову установку для відкачування пароповітряної суміші з застосуванням рідинно-парового ежектора, для більшого енергозаощадження. Також розглянуто роботу РПЕ в поєднанні з рідинно-кільцевим вакуумним насосом, де РПЕ виконує роль форвакуумного агрегату.

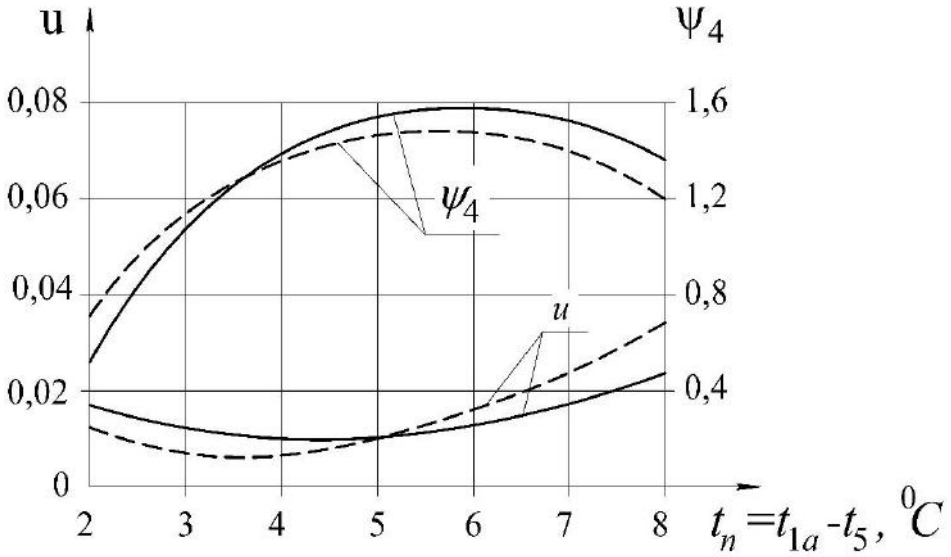


Рисунок 2.36 – Режимні параметри рідинно-парового ежектора для умов: p_{p1}=1,5–2,5 · 10^5 Па, t_{p1}=92–104 °C: — p_{s1}=0,17·10^3 Па, – – – p_{s1}=0,2·10^3 Па (u – коефіцієнт інжекції, ψ_4 – ступінь перевиробництва пари, t_5 – температура змішаного потоку на виході з ежектора, t_{1a} – температура активного потоку на вході в ежектор)

Робочим середовищем установки є n-пентан, проектна потужність 4 МВт. Також використовується вода від котла-утилізатора, як теплоносій для перегрівання та випаровування в турбіні низького тиску. Параметри робочого середовища на вході в активне сопло РПЕ становить t_{p1}=104 °C, p_{p1}=1,6 · 10^5 Па. Тиск на виході з ежектора різний і залежить від конструктивного виконання схеми. Для схеми на базі РПЕ він становить p_{out}=1·10^5 Па, для схеми РПЕ+РКВН – p_{out}=0,8·10^5 Па. Тиск паро-повітряної суміші на вході в РПЕ p_{s1} = 0,17·10^3 Па.

Оптимізаційним параметром при ексергетичному аналізі є різниця температур активного потоку на вході до РПЕ і рідкої фази на виході із сепаратора Δt_n, що визначає навантаження і витрату котельної пари на теплообмінник-підігрівач. Були виконані числові дослідження впливу цієї величини на показники ефективності робочого процесу при варіюванні початкових параметрів робочої рідини активного потоку на вході до РПЕ. На рис. 1 подано зв’язок режимних параметрів РПЕ в інтервалі оптимальних значень для цієї конденсаційної установки. [499]

Для оцінювання можливості модернізації конденсаційної установки парової турбіни шляхом застосування РПЕ у роботі використовуються числові методи дослідження, а саме термодинамічний, ексерегтичний та термоекономічний.

Термодинамічний розрахунок традиційних конденсаційних установок виконано за методикою, яка викладена у роботі [510].

Для оцінювання ексергетичної ефективності термомеханічних систем, найбільш коректним є залучення ексергетичного методу термодинамічного аналізу [511]. Він є досить точним для систем, в яких відбувається одночасне перетворення декількох видів енергії (електричної і теплової).

Ексергетичне оцінювання ступеня досконалості енергоперетворень у досліджуваній системі базується на введенні в розгляд нової величини – показника ексергетичної ефективності – який є відношенням ексергії потоку продукту системи до ексергії потоку палива [507, 512].

Відповідно до цієї методології основним показником під час порівняння схемних рішень слугує величина ексергетичної ефективності ε_{ex}:

$$\varepsilon_{ex} = \frac{E_P}{E_F}, \tag{2.47}$$

де E_P – ексергія потоку продукту (product) системи;

E_F – ексергія потоку палива (fuel) системи.

Різниця значень E_F та E_P дає значення деструкції E_D і втрат ексергії E_L у процесах енергоперетворень у даній системі, тобто

$$E_D + E_L = E_F - E_P. \tag{2.48}$$

Необхідно відзначити, що величина E_D характеризує рівень дисипативних втрат за рахунок внутрішньої незворотності, а E_L зумовлена наявністю зовнішнього теплообміну компонентів системи з довкіллям. Застосування

ексергетичного аналізу даного виду не потребує залучення ентропійного аналізу для розрахунку загальної деструкції та втрат ексергії в системі. [499]

Термоекономічний аналіз є новим методом оцінки ефективності термомеханічних систем та полягає у визначенні вартості енергоресурсів, необхідних для базової та енергозберігаючої схем. Термоекономічний метод аналізу термомеханічних систем – це комбінація ексергетичного (термодинамічного) та вартісного аналізу. Основний критерій термоекономічного методу аналізу – це ексергетична вартість продукту системи (його частини, компоненту і т. д.). [499]

Основний критерій термоекономічного методу аналізу – це ексергетична вартість продукту системи (його частини, компоненту та ін.). [499]

Для будь-якого потоку ексергії ексергетична вартість має вигляд

$$C_j = c_j \cdot E_j, у.о./год, \tag{2.49}$$

де c_j – ціна ексергії, *у. о./(кВт · год), у. о./кДж*.

Під час розраховування ціни ексергії для вхідних потоків, що перетинають межі системи, загальний вигляд зв'язку між ціною ексергії та тарифами на енергоносії характеризується таким виразом:

$$c_{in} \cdot E_{in} = ц_{in} \cdot I_{in}, у.о./год, \tag{2.50}$$

який визначає рівність ексергетичної вартості і натуральної вартості кількості енергоносія, який купує споживач системи.

Тут I_{in} – параметр інтенсивності потоку енергоносія (масова чи об'ємна витрата, потужність та ін.).

Результати дослідження ефективності впровадження рідинно-парового ежектора для конденсаційних установок парових турбін

1. Опис схемних рішень

Для порівняння спочатку була розглянута базова установка автономної електростанції на базі газотурбінного двигуна з паровим блоком. У ній для

видалення повітря з контуру конденсатора використовується двоступеневий ежекторний агрегат, який працює на технологічній парі (рис. 2.37).

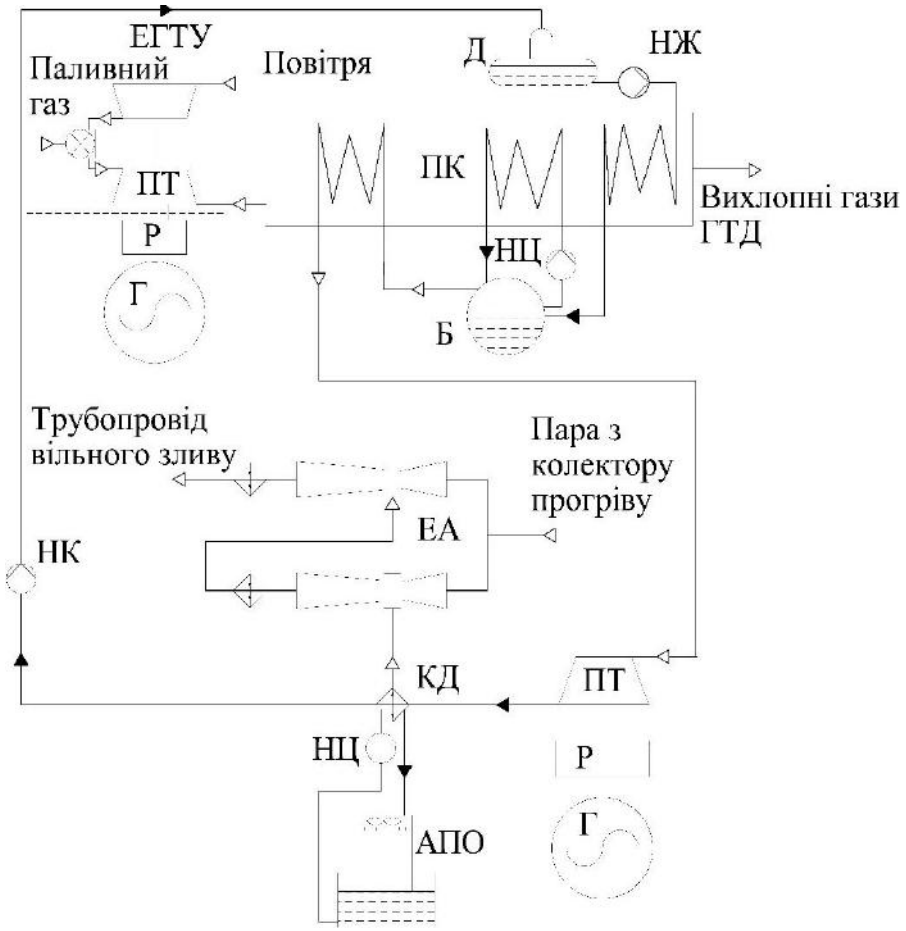


Рисунок 2.37 – Базова схема конденсаційної установки: ЕА – двоступеневий ежекторний агрегат, ПК – паровий котел, ПТ – парова турбіна, КД – конденсатор, НЦ – насос циркуляційний, НК – насос конденсаційний, Д – деаератор, НЖ – насос живильний, Б – барабан, Г – генератор, Р – редуктор, ЕГТУ – енергогазотурбінна установка

Зі зниженням тиску і температури пари, що відпрацювала в турбіні, зменшується кількість теплоти, що передається холодному джерелу. Як відомо з термодинаміки, при постійних параметрах свіжої пари підвищує потужність турбіни (за рахунок збільшення теплоперепаду на неї) і економічність циклу в цілому. Паротурбінне доповнення газотурбінного двигуна реалізується на обмеженні параметрів згенерованої водяної пари для застосування осерадіальної парової турбіни, що дозволяє підвищити тиск конденсації прийнятний для даних установок. Це дозволяє досягти високого термічного ККД усієї установки. [499]

Була використана запропонована схема (рис. 2.38) в якості застосування вакуумного агрегату на базі РПЕ, що дозволяє замінити двоступеневий пароструминний ежектор на одноступеневий рідинно-паровий, з високим ККД. Це веде до зниження споживання котельної пари і зниження початкових параметрів робочого середовища активного потоку на вході до сопла, що є досконалішим циклом перетворення енергії.

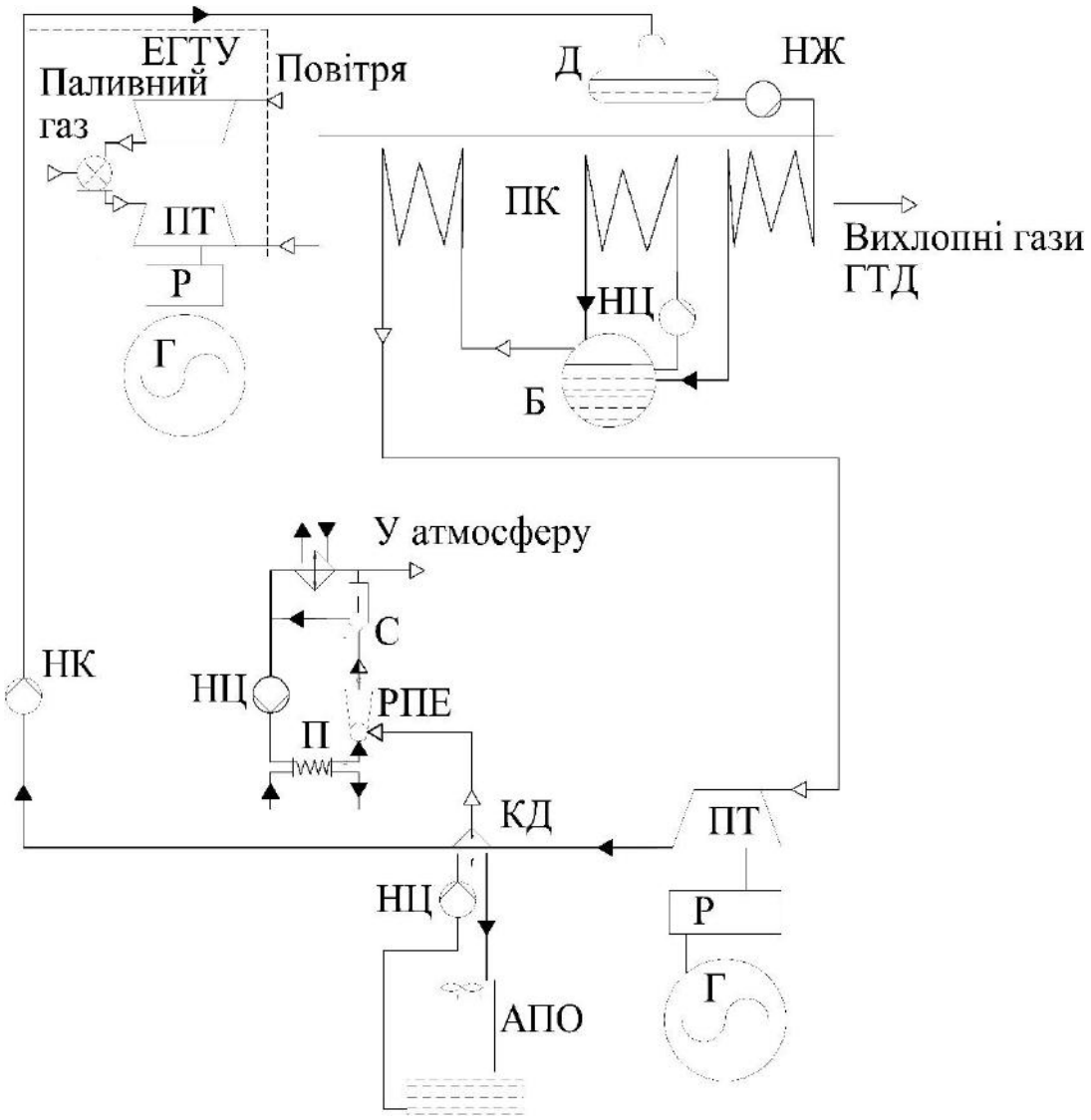


Рисунок 2.38 – Альтернативна схема конденсаційної установки на базі рідинно-парового ежектора: РПЕ – рідинно-паровий ежектор, С – сепаратор, НЦ – циркуляційний насос, П – теплообмінник-підігрівач, ПК – паровий котел, ПТ – парова турбіна, КД – конденсатор, НЦ – насос циркуляційний, НК – насос конденсаційний, Д – деаератор, НЖ – насос живильний, Б – барабан, Г – генератор, Р – редуктор, ЕГТУ – енергогазотурбінна установка

Також було розглянуто схему РПЕ у складі вакуумного агрегату, де він використовується як форвакуумний агрегат для підвищення тиску пасивного потоку в РКВН (рис 2.39).

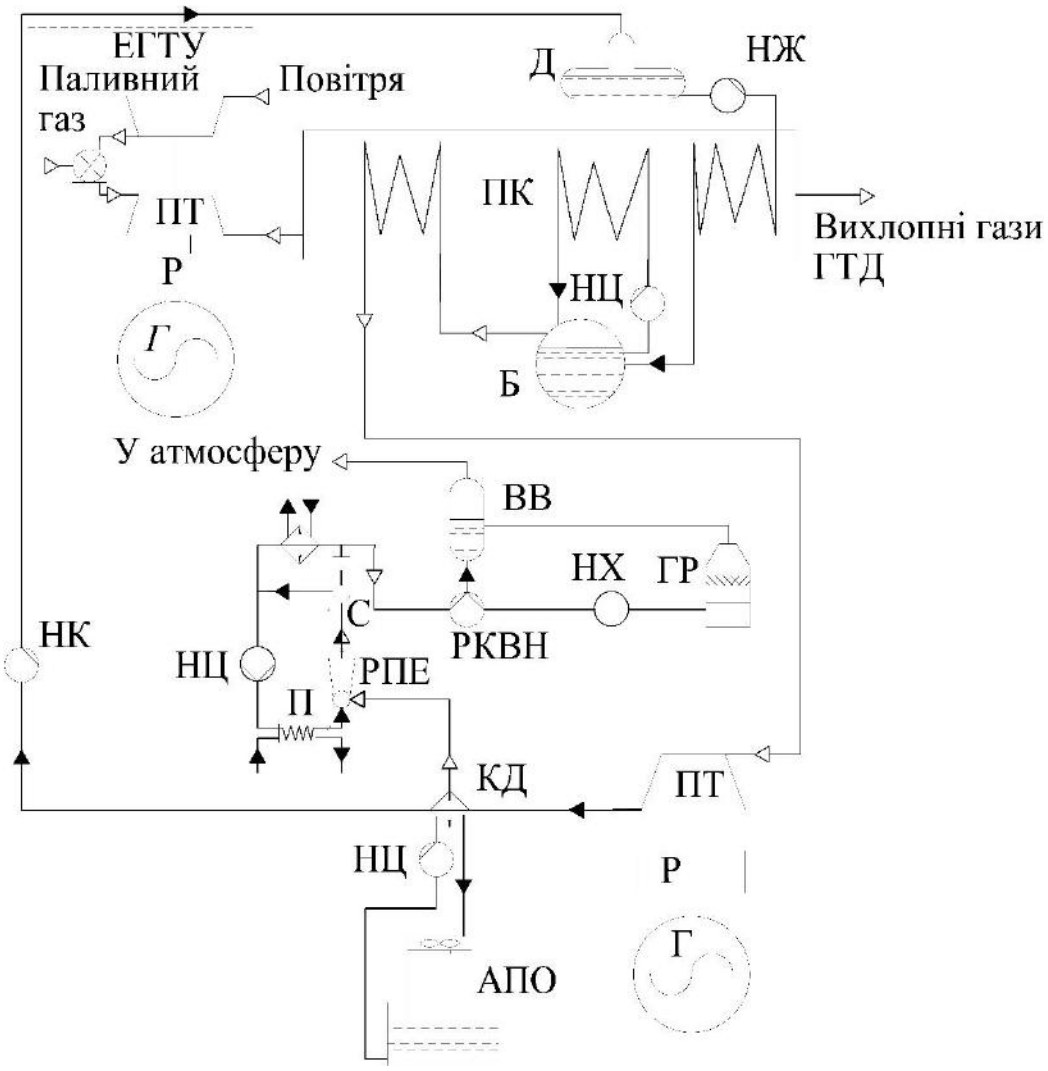


Рисунок 2.39 – Альтернативна схема конденсаційної установки на базі «рідинно-паровий ежектор+рідинно-кільцевий вакуумний насос»: РПЕ – рідинно-паровий ежектор, С – сепаратор, НЦ – циркуляційний насос, П – теплообмінник-підігрівач, РКВН – рідинно-кільцевий вакуумний насос, ВВ – відділювач води, ГР – градирня, НХ – насос холодоносія, ПК – паровий котел, ПТ – парова турбіна, КД – конденсатор, НЦ – насос циркуляційний, НК – насос конденсаційний, Д – деаератор, НЖ – насос живильний, Б – барабан, Г – генератор, Р – редуктор, ЕГТУ – енергогазотурбінна установка

Таким чином, є підстави вважати, що застосування рідинно-парового

ежектора в конденсаційних установках парових турбін є перспективним. Проте питання щодо його ефективності порівняно з традиційними пароструминними ежекторними агрегатами залишається відкритим та потребує дослідження.

2. Результати термодинамічного розрахунку

Розрахунок ефективності конденсаційної установки на базі рідинно-парового ежектора потребує попереднього термодинамічного розрахунку за методикою, яка викладена у роботі [509]. Дана методика передбачає знаходження режимних параметрів у вузлових точках циклу. Розрахунки було проведено для двох варіантів альтернативних схем: на базі РПЕ та на базі РПЕ+РКВН.

Режимні параметри двох альтернативних варіантів наведено у табл. 2.9. Результати термодинамічного розрахунку подані у табл. 2.10.

Таблиця 2.9 – Режимні параметри конденсаційних установок

№ п/п	Найменування показника	Варіант схеми	
		з РПЕ	з РПЕ + РКВН
1	Тиск рідини на вході в активне сопло РПЕ, бар	1,6	1,6
2	Температура на вході в РПЕ, ^0C	104	104
3	Тиск пасивного потоку на вході в РПЕ, бар	0,17	0,17
4	Тиск змішаного потоку на виході з РПЕ, бар	1	0,8
5	Коефіцієнт інжекції РПЕ	0,04147	0,0334
6	Ступінь перевиробництва пари	1,165	1,209
7	Ефективність РПЕ	0,657	0,714

Одержані результати термодинамічного аналізу свідчать про перспективу застосування пропонованого рішення завдяки зниженню початкового тиску та масової витрати котельної пари.

3. Результати ексергетичного аналізу

Схема ексергетичних перетворень у традиційній конденсаційній установці та в альтернативних схемах зображена на рис. 2.40.

Таблиця 2.10 – Результати термодинамічного розрахунку [499]

№ п/п	Найменування показника	Варіант схеми		
		базовий	з РПЕ	з РПЕ + РКВН
1	Початковий тиск у системі вакуумування, *бар*	0,17	0,17	0,17
2	Тиск котельної пари, *бар*	9	1,6	1,6
3	Температура котельної пари, °*С*	210	104	104
4	Масова витрата котельної пари, *кг/с*	448	1,489	1,489
5	Масова витрата повітря, *кг/с*	28	28	28
6	Масова витрата пари, *кг/с*	25	25	25
7	Питома потужність циркуляційного насосу, *кВт*	–	0,09	0,04
8	Питома потужність насосу холодоносія, *кВт*	–	–	0,01
9	Питома потіжність вентилятора градирні, *кВт*	–	–	0,007
10	Питома потужність рідинно-кільцевого вакуумного насоса, *кВт*	–	–	0,03

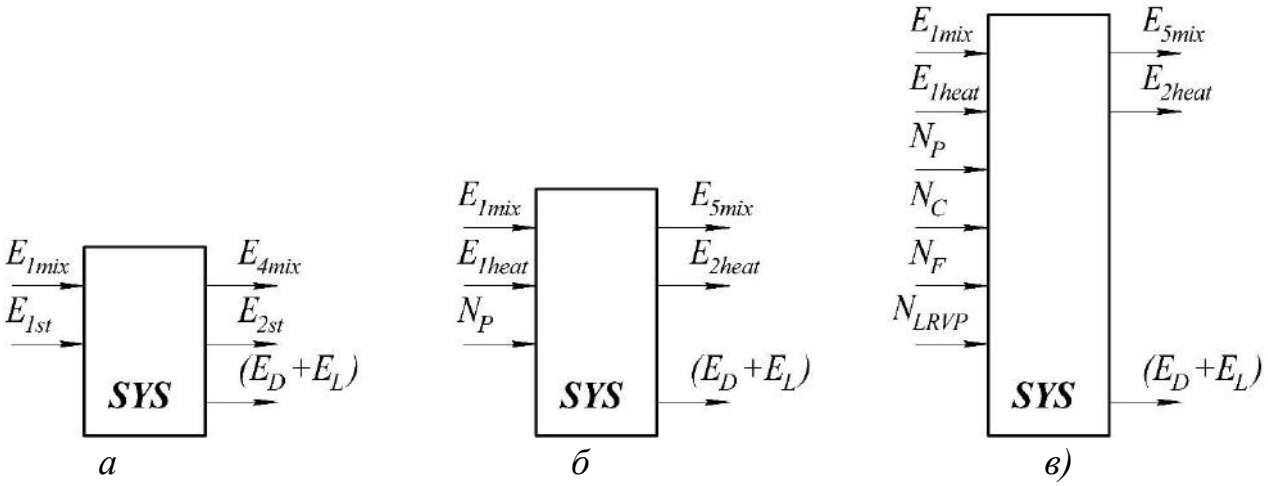


Рисунок 2.40 – Схема ексергетичних перетворень: *а* – традиційної конденсаційної установки, *б* – установки на базі рідинно-парового ежектора, *в* – установки на базі «рідинно-паровий ежектора+рідинно-кільцевий вакуумний насос» (E_{1mix} – ексергія пароповітряної суміші на вході до ежекторного агрегату, E_{4mix} – ексергія пароповітряної суміші на виході з ежекторного агрегату, E_{1st} – ексергія котельної пари на вході до ежекторного агрегату, E_{2st} – ексергія котельної пари на виході з ежекторного агрегату, E_{1mix} – ексергія пароповітряної суміші на вході до рідинно-парового ежектора, E_{5mix} – ексергія пароповітряної суміші на виході з рідинно-парового ежектора, E_{1heat} – ексергія охолоджувальної води на вході до теплообмінника, E_{2heat} – ексергія охолоджувальної води на виході з теплообмінника,

N_P – потужність насоса циркуляційного, N_C – потужність насосу холодоносія, N_F – потужність вентилятора градирні, N_{LRVP} – потужність рідинно-кільцевого вакуумного насосу, (E_D + E_L) – абсолютна деструкція ексергії та абсолютні втрати ексергії)

Рівняння ексергетичної ефективності мають вигляд:

– для традиційної схеми

$$\varepsilon_{ex1} = \frac{E_{P1}}{E_{F1}} = \frac{E_{4mix} - E_{1mix}}{E_{1st} - E_{4st}}, \tag{2.51}$$

– для схеми з РПЕ

$$\varepsilon_{ex2} = \frac{E_{P2}}{E_{F2}} = \frac{E_{5mix} - E_{1mix}}{\left(E_{1heat} - E_{2heat}\right) + N_P}, \tag{2.52}$$

– для схеми з РПЕ+РКВН

$$\varepsilon_{ex3} = \frac{E_{P3}}{E_{F3}} = \frac{E_{5mix} - E_{1mix}}{\left(E_{1heat} - E_{2heat}\right) + N_P + N_C + N_F + N_{LRVP}}, \tag{2.53}$$

де E_{1mix} – ексергія пароповітряної суміші на вході до ежекторного агрегату,

E_{4mix} – ексергія пароповітряної суміші на виході з ежекторного агрегату,

E_{1st} – ексергія котельної пари на вході до ежекторного агрегату,

E_{2st} – ексергія котельної пари на виході з ежекторного агрегату,

E_{1mix} – ексергія пароповітряної суміші на вході до РПЕ,

E_{5mix} – ексергія пароповітряної суміші на виході з РПЕ,

E_{1heat} – ексергія охолоджувальної води на вході до теплообмінника,

E_{2heat} – ексергія охолоджувальної води на виході з теплообмінника,

N_P – потужність насоса циркуляційного,

N_C – потужність насосу холодоносія,

N_F – потужність вентилятора градирні,

N_{LRVP} – потужність рідинно-кільцевого вакуумного насосу.

Результати ексергетичного аналізу наведено у табл. 2.11.

Таблиця 2.11 – Результати ексерегтичного аналізу [499]

№ п/п	Найменування показника	Варіант схеми		
		базовий	з РПЕ	з РПЕ + РКВН
1.	Ексергія потоку палива, *кВт*	297,2	62,95	58,74
2.	Ексергія потоку продукту, *кВт*	93,05	44,86	44,86
3.	Ексергетична ефективність	0,313	0,713	0,764

У результаті ексергетичного аналізу можна зробити висновок, що ефективність схеми конденсаційної установки на базі рідинно-парового ежектора в 2,3 рази більше, ніж у традиційної. Застосування РКВН в альтернативній схемі та переведення РПЕ у форвакуумний режим роботи дозволяє додатково підвищити ефективність на 17 % порівняно зі схемою на базі РПЕ, що у 2,44 рази більше порівняно з альтернативною схемою.

4. Результати термоекономічного аналізу

Загальна вартість палива для традиційної схеми визначається за формулою:

$$C_1 = C_{st1} \cdot \dot{V}_{w1} \cdot \tau_p + C_{e1} \cdot \sum N_1 \cdot \tau_p, \tag{2.54}$$

де C_{st1} – вартість 1 м^3 котельної пари води, $\dot{V}_{st1}$ – об’ємна витрата котельної пари, C_{e1} – вартість електроенергії, $\sum N_1$ – сума споживаних потужностей, яка витрачається на привод та насосів, τ_p – розрахунковий період роботи установки.

Загальна вартість палива для пропонованої схеми визначається за формулою:

$$C_2 = C_{st2} \cdot \dot{V}_{w2} \cdot \tau_p + C_{e2} \cdot \sum N_2 \cdot \tau_p, \tag{2.55}$$

де C_{st2} – вартість 1 м^3 котельної пари, $\dot{V}_{st2}$ – об’ємна витрата котельної пари, C_{e2} – вартість електроенергії, $\sum N_2$ – сума споживаних потужностей, яка витрачається на привід насосів, τ_p – розрахунковий період роботи установки.

Результати термоекономічного аналізу наведено у табл. 2.12.

Одержані результати розрахунку загальної вартості палива та питомої вартості одиниці продукту дають можливість стверджувати, що застосування

РПЕ в конденсаційних установках парових турбін є доцільним. Це дозволяє зменшити витрати на генерацію котельної пари та знизити вартість кінцевого продукту паротурбінної установки приблизно на 51 %.

Таблиця 2.12 – Результати термоекономічного аналізу [499]

№ п/п	Найменування параметру	Варіант схеми		
		базовий	з РПЕ	з РПЕ + РКВН
1	Загальна вартість палива, у. о.	1348,57	643,88	644,71
2	Питома вартість одиниці продукту, у. о./т	2,17	1,06	1,08
3	Питома вартість одиниці пари, у. о./м^3	3,01	2,11	2,13

Обговорення доцільності застосування рідинно-парового ежектора для підвищення ефективності конденсаційних установок парових турбін

Оцінюючи одержані результати термодинамічного, ексергетичного та термоекономічного аналізів обох пропонованих схем, можна виділити кілька суттєвих переваг пропонованої схеми на базі РПЕ (рис. 2.38), що полягають у спрощенні конструкції та збільшенні ефективності традиційної конденсаційної системи. Але застосування рідинно-парового ежектора як форвакуумного в поєднанні з рідинно-кільцевим вакуумним насосом (рис. 2.39) дає змогу зменшити ступінь підвищення тиску пасивного потоку в РПЕ та перевести його на більш помірний режим роботи. Завдяки цьому збільшується ефективність РПЕ та зменшується ступінь перевиробництва пари, яку необхідно повертати в цикл від зовнішнього джерела.

Були виявлені наступні особливості. Для роботи пароструминного ежектора необхідна постійна зовнішня генерація котельної пари заданих параметрів. Це особливо важко забезпечити, якщо на виробництві немає постійного джерела цієї пари, тому що її витрата на різних режимах роботи становить в межах 350–700 кг/с.

Обидва пропоновані рішення дозволяють уникнути таких проблем, завдяки тому, що генерація робочої пари відбувається всередині рідинно-парового ежектора, а саме в соплі активного потоку. В дифузорній частині сопла недогріта до насичення вода починає закипати та створювати робочу пару для

ежектування пасивного потоку. Саме це дозволило отримати такі показники його ефективності.

Найбільш близькими по конструкції до пропонованих є однофазні пароежекторні агрегати, в яких застосовуються пароструминні ежектори з робочим середовищем – котельна пара. Але вони, як правило, є багатоступеневими та їх загальна ефективність зазвичай не перевищує 2–5 %. Це зумовлено тим, що одному ступені пароструминного ежектора можна створити перепад тисків лише у 2–3 рази. В одному рідинно-паровому ежекторі такий перепад є на рівні 8–10.

Обмеженнями в області застосування даного виду ежекторів можна вважати ступінь підвищення тиску пасивного потоку в одному рідинно-паровому ежекторі. Якщо необхідно значне підвищення тиску більше 10–12, то все одно необхідно застосовувати двоступеневий агрегат або форвакуумні насоси (бустерні чи молекулярні).

Дане дослідження можна продовжити і в подальшому застосувати для підвищення ефективності схожих парогазових установок. Проте обмеження ступеня підвищення тиску в одному рідинно-паровому ежекторі стримує цю сферу застосування. Але ведуться дослідження по впливу масштабного фактора на його ефективність і можливим виходом є збільшення діаметру критичного перерізу сопла активного потоку чи додаткове профілювання його проточної частини.

2.2.4 Перевиробництво пари у рідинно-паровому ежекторі: його вплив на ефективність робочого процесу вакуумного агрегату

У сучасному світі головною проблемою всіх галузей промисловості є енергозбереження та збереження навколишнього середовища. Саме тому для різних галузей виробництва необхідно розробляти установки та системи, які були б енергоефективними та, водночас, не спричиняли шкоди довкіллю.

Досить широкого застосування набувають технологічні процеси, які реалізуються при тисках, які нижчі за атмосферний. Одним з нових типів апаратів, що застосовується в таких системах є рідинно-паровий ежектор (далі –

РПЕ), який працює за принципом струминної термокомпресії. Як активний потік у ньому застосовується недогріта до насичення вода. Вона закипає при витіканні з сопла активного потоку і відкачує пасивний потік, що являє собою парову фазу майже будь-якої речовини або суміші. Вода, яка застосовується як робоча речовина активного потоку є дешевим та екологічно чистим продуктом, а її застосування в таких системах є перспективним та інноваційним.

Ефективність такого апарату та вакуумного агрегату на його базі залежить від завершеності процесу змішування активного та пасивного потоків і досягнення необхідних параметрів змішаного потоку на виході з РПЕ. Одним з головних таких показників є ступінь перевиробництва пари. Цей параметр визначає кількість пари, яку необхідно повернути в цикл і є різницею між кількістю пари, яка відводиться з сепаратора як парова фаза та кількістю пасивного потоку, який ежектується.

Досліджуване питання є актуальним з точки зору наукової проблематики для модернізації існуючих систем і створення нових енергоощадних та екологічно чистих виробничих установок. Зокрема, було б зручно мати доступну альтернативу сучасним пароструминним ежекторам, для роботи яких потрібна зовнішня генерація робочої пари. Цей процес є дороговартісним і потребує додаткового устаткування та ускладнення технологічної схеми установки. З метою оцінювання очікуваного ефекту від впровадження нового типу апаратів, необхідно провести числове та експериментальне дослідження РПЕ з різною геометрією проточної частини та знайти оптимальне конструктивне рішення.

Створені на даний час двофазні струминні апарати, хоча й мають значні переваги порівняно з однофазними, але через складність робочого процесу, який в них відбувається є мало вивченим [513]. Останні європейські та світові дослідження були присвячені вивченню роботи двофазних струминних апаратів на різних холодильних агентах або вуглекислому газі [514]. Основним їх недоліком є вартість робочого середовища (холодильного агента) та питання його безпеки та екологічності.

Останнім часом стали з’являтися дослідження, в яких все більше пропонують використовувати воду або водяний пар, як і пароструминних

ежекторах, в якості робочого середовища активного потоку [515]. Однак, як відомо, вода має і негативні властивості, серед яких утворення накипу, що є неминучим за таких умов робочого процесу. Та це вирішується досить просто, і автори роботи [516] пропонують використовувати ефіри та водні розчини, які мають нейтральні властивості та не призводять до взаємодії з пасивним потоком на хімічному рівні.

Наступним кроком є дослідження геометрії та конструктивних особливостей проточної частини двофазних струминних апаратів [517]. Від її параметрів напряму залежить ефективність робочого процесу як самого апарату, так і системи в цілому. Як зазначалося вище робочий процес двофазних струминних апаратів є достатньо складним, що не дозволяє уніфікувати їх розробку та випуск. Кожен з таких апаратів розробляється для конкретного призначення та для певного ступеня підвищення тиску [518]. Дослідження двофазних струминних апаратів в певному діапазоні робочих параметрів та оптимізація геометрії проточної частини дає змогу розширити область їх застосування. В роботі розглядається можливість створення ефективного вакуумного агрегату на базі рідинно-парового ежектора з проточною частиною такої конструкції, в якій максимально ефективно буде відбуватися його робочий процес. Вибір робочих параметрів та опис числових та експериментальних методів дослідження рідино-парового ежектора у складі вакуумного агрегату

1. Початкові дані та конструктивні схеми

Початкові дані для числового моделювання та експериментального дослідження вибрані для режиму роботи вакуумного агрегату в складі вакуумної системи охолодження установки для виробництва біодизельного палива [519].

За робочу речовину активного потоку прийнята вода, яка на вході в сопло активного потоку має наступні параметри: тиск p_{01} = 0,4 *МПа*, температура t_{01} = 135°*C*, масова витрата m_p = 0,4918 *кг/с*.

За робочу речовину пасивного потоку прийнято водяну пару, яка на вході до приймальної камери має тиск p_{02} = 0,02 *МПа*. Температура пасивного потоку відповідає температурі насичення за відповідного тиску. Масова витрата m_s є

змінною та залежить від коефіцієнта інжекції для кожного РПЕ з відповідною геометрією.

На виході з РПЕ маємо потік двофазної парокрапельної дрібнодисперсної структури з масовою витратою змішаного потоку, яка є сумою витрат активного і пасивного потоків. Тиск і температура кінцевого потоку залежать від геометричних параметрів проточної частини ежектора (рис. 2.41).

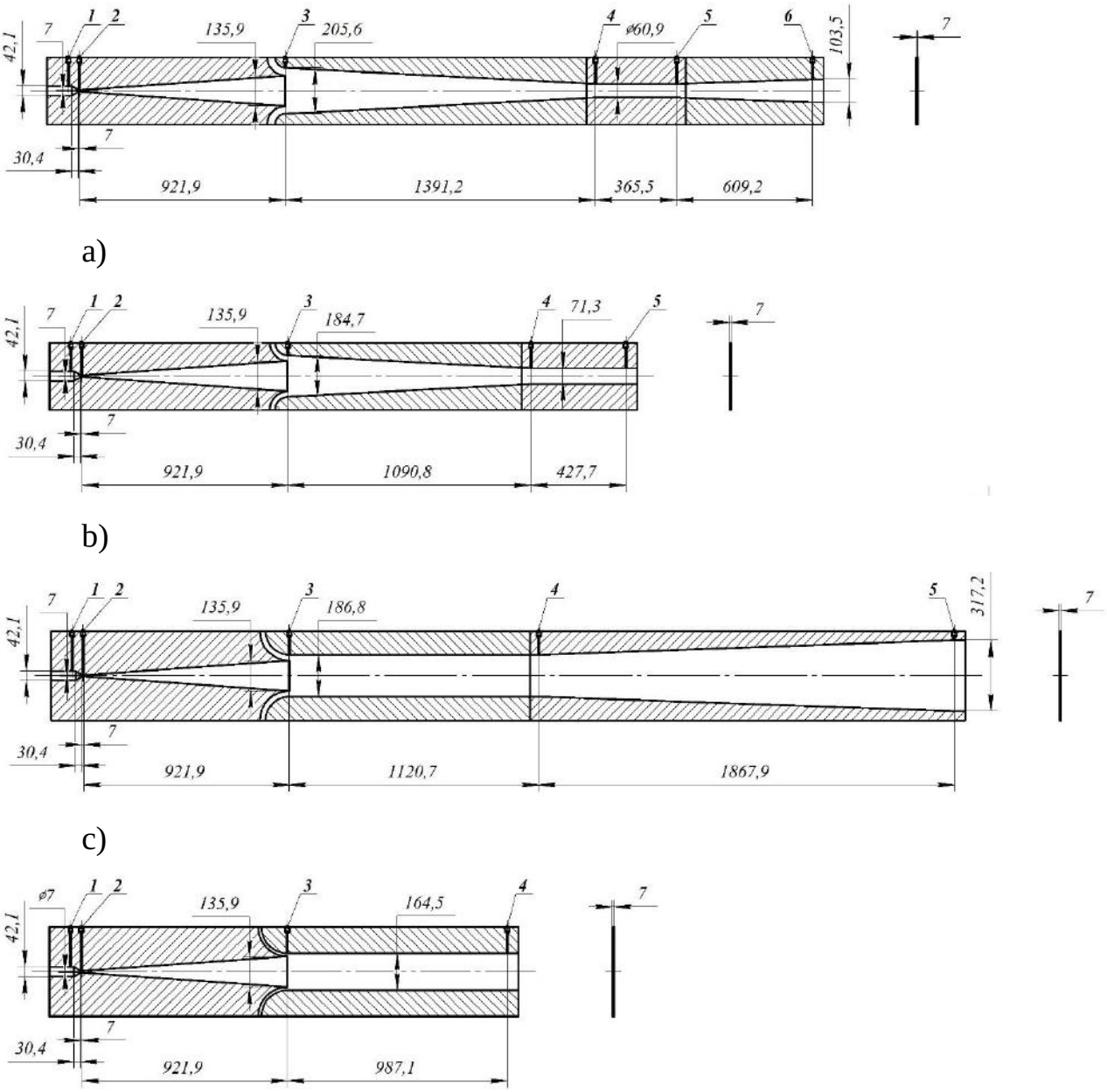


Рисунок 2.41 – Конструктивні схеми рідинно-парового ежектора з різною геометрією проточною частиною (розміри в мм): a – з конічною камерою змішування та дифузором; b – з конічною камерою змішування без дифузору;

c – з циліндричною камерою змішування та дифузором; d – з циліндричною камерою змішування без дифузору; 1…6 – місця замірів тиску

Згідно з поставленою метою дослідження розглядалися РПЕ з різною геометрією проточної частини (рис. 2.41), які відрізняються геометричною формою камери змішування та наявністю чи відсутністю дифузора.

2. Математична модель розрахунку робочого процесу рідинно-парового ежектора

Для розрахунку осереднених параметрів по довжині проточної частини і сумарних характеристик РПЕ застосовують систему рівнянь одновимірного адіабатного руху у квазірівноважному термодинамічному наближенні для виділених меж розглянутої ділянки течії [520]:

$$\begin{cases} \upsilon = \upsilon_{liq}(t_{liq}) + x \cdot \left[\upsilon_{st}(p) - \upsilon_{liq}(t_{liq})\right] \\ d\left[\dfrac{w(z) \cdot F(z)}{\upsilon}\right] = 0 \\ dx = \chi(z) \cdot \left[\dfrac{\upsilon}{w(z)}\right] dz \\ d\left\{h_{liq}(t_{liq}) + x \cdot \left[h_{st}(p) - h_{liq}(t_{liq})\right] + \dfrac{w^2(z)}{2}\right\} = 0, \\ d\left[\dfrac{w^2(z) \cdot F(z)}{\upsilon}\right] = -F(z)dp - \tau_w \cdot \Pi(z)dz \\ d\{s_{liq}(t_{liq}) + x \cdot \left[s_{st}(p) - s_{liq}(t_{liq})\right]\} = \delta s_{diss} > 0 \\ \tau_w = \left(\dfrac{\xi}{4}\right)^2 \cdot \dfrac{w^2(z)}{2 \cdot \upsilon} \end{cases} \quad (2.56)$$

де υ – питомий об’єм частинки і-ї групи розподілу, *м*^{3}/*кг*; t – температура частинки *i*-ї групи розподілу, *град.*; w – середня швидкість потоку частинок, *м/с*; F – площа каналу, через яку проходять частинки *i*-ї групи розподілу, *м*^{2}; z – безрозмірна повздовжня координата; χ – масовий вміст вологи, *кг/кг*; h – ентальпія частинки *i*-ї групи розподілу, *Дж/кг*; τ_w – дотичне напруження на стінці каналу, *Па*; П – периметр каналу, через який проходять частинки *i*-ї групи розподілу, *м*; s – ентропія частинки *i*-ї групи розподілу, *Дж/(кг · К)*; індекс «liq» – параметр у стані рідини, індекс «st» – параметр у стані пари.

Розв'язавши систему рівнянь (2.56) з прийнятими в роботі [517] допущеннями, можна отримати формулу для обчислення масового паровмісту в змішаному потоці двофазної парокрапельної дрібнодисперсної структури, яку ми маємо на виході з РПЕ:

$$x_4 = \frac{h_4 - h_{4\,liq}}{r_4}, \tag{2.57}$$

де h_4 – ентальпія змішаного потоку на виході з РПЕ, *Дж/кг*; r_4 – питома теплота пароутворення змішаного потоку на виході з РПЕ, *Дж/кг*.

В процесі ежектування пасивного потоку, який буде являти собою насичену водяну пару, буде відбуватися змішування двох потоків, і на виході з РПЕ будемо мати потік двофазної парокрапельної дрібнодисперсної структури. Масова витратою змішаного потоку (m_t) є сумою витрат активного (m_p) і пасивного (m_s) потоків:

$$m_t = m_p + m_s. \tag{2.58}$$

В процесі сепарації більша частина потоку буде конденсуватися та направлятися знову в робочий цикл вакуумного агрегату, а частина яка не сконденсувалася (m_{loss}) буде відводитися у вигляді парової фази з циклу. Для збереження постійності масової витрати активного потоку і, таким чином, всіх параметрів циклу, необхідно постійно повертати додаткову масу рідини в цикл:

$$m_p = m_s + m_{loss}. \tag{2.59}$$

Підставивши (2.59) в (2.58) та виконавши перетворення, отримаємо формулу для визначення ступеня перевиробництва пари в робочому процесі РПЕ. Його величина буде визначати, скільки рідини необхідно повернути в цикл для збереження матеріального балансу:

$$\psi_4 = 1 + \frac{m_{loss}}{m_s}. \quad (2.60)$$

У безрозмірному вигляді формула для визначення ступеня перевиробництва пари буде мати вигляд

$$\psi_4 = \frac{x_4 \cdot (1 + u)}{u}, \quad (2.61)$$

де u – коефіцієнт інжекції, що визначається за формулою

$$u = \frac{m_s}{m_p}. \quad (2.62)$$

3. Експериментальний стенд для дослідження рідино-парового ежектора у складі вакуумного агрегату

Експериментальна установка для досліджень РПЕ у вакуумному режимі (рис. 2.42) складається безпосередньо з ежектора 1, двох нагрівальних ємностей 2 та 18 для нагрівання води і допоміжних комунікацій, трубопроводів та арматури. [521]

Під час випробувань РПЕ у вакуумному режимі робоча рідина активного потоку подається з ємності 8 за допомогою насоса 9 в нагрівальну ємність 2. Запірні вентилі 4 і 12 служать для припинення подачі робочої рідини в нагрівальну ємність після її наповнення. Рівень рідини в нагрівальній ємності контролюється вентилем 5. Потім робоча рідина нагрівається блоком ТЕНів 7. Тиск в ємності контролюється манометром 6. Запобіжний клапан 3 служить для аварійного скидання тиску в разі перевищення допустимого значення. Скидання в дренаж здійснюється за допомогою вентиля 15. [521]

Після нагрівання і досягнення необхідного значення тиску робоча рідина, що перебуває у стані насичення, через теплообмінник типу «труба в трубі» 17 подається в сопло активного потоку РПЕ. Регулювання витрати рідини здійснюється вентилем 16. Охолоджувальна вода для теплообмінника подається

з ємності 8. Циркуляція води через теплообмінник здійснюється за допомогою насоса 9. Вентилі запірної арматури 11 і 12 служать для відкриття або закриття подачі охолоджувальної води на насоси. Регулювання подачі охолоджувальної води здійснюється за допомогою регулювального вентиля 13. [521]

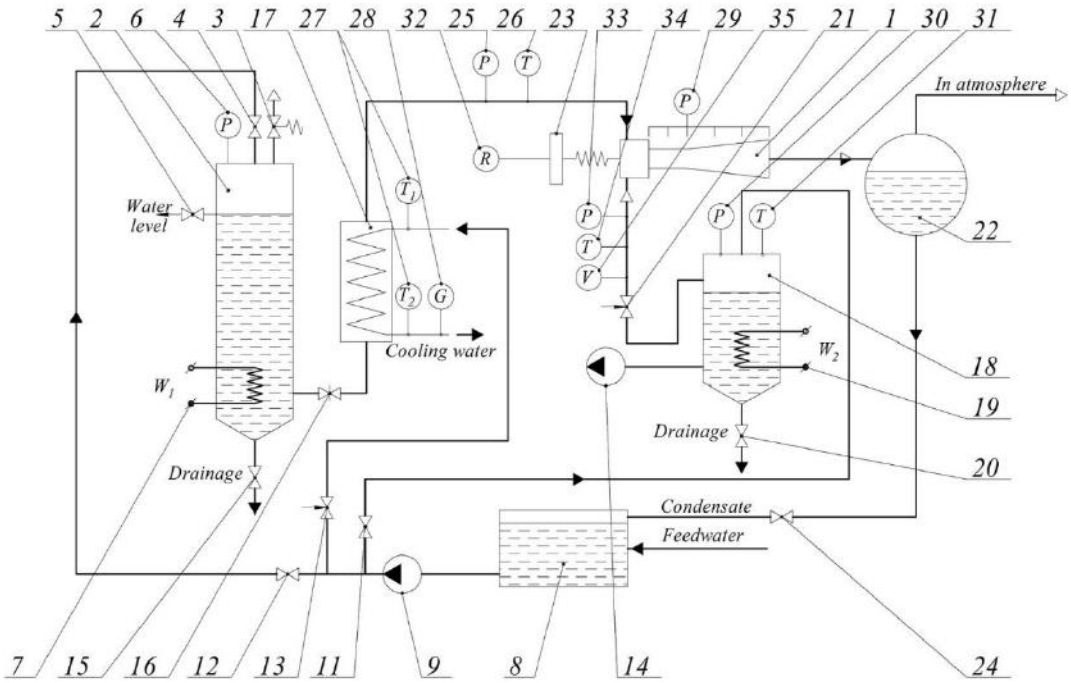


Рисунок 2.42 – Схема експериментального стенду для дослідження рідино-парового ежектора у складі вакуумного агрегату [521]:
1 – РПЕ; 2, 18 – нагрівальна ємність; 3 – запобіжний клапан;
4, 5, 11, 12, 15, 20, 24 – вентиль запірний; 6, 25, 29 – манометр;
7, 19 – блок ТЕНів; 8 – ємність для води; 9 – циркуляційний насос;
13, 16, 21 – вентиль регулюючий; 14 – рідинно-кільцевий вакуум-насос;
17 – теплообмінник типу «труба в трубі»; 22 – сепаратор; 23 – ваги цифрові;
26, 27, 31,34 – цифровий мультиметр; 28 – витратомір масовий;
30, 33 – вакуумметр; 35 – лічильник об’ємної витрати

На ділянці від нагрівальної ємності 2 до сопла активного потоку контролюються такі параметри: тиск – манометром 25, температури – термопарами з цифровим мультиметром 26 і 27, масова витрата охолоджувальної води – витратоміром масовим 28. [521]

Робоча рідина пасивного потоку подається з ємності 8 за допомогою насоса 9 у нагрівальну ємність 18, де нагрівається блоком ТЕНів 19. Запірний вентиль

11 служить для припинення подання робочої рідини у нагрівальну ємність після її наповнення. Величина вакууму у нагрівальнійй ємності 18 забезпечується рідинно-кільцевим вакуум-насосом 14 і контролюється вакуумметром зразковим 30. Температура у нагрівальній ємності 18 контролюється термопарою з цифровим мультиметром 31. Скидання в дренаж здійснюється за допомогою вентиля 20. [521]

Потім пара подається до приймальної камери пасивного потоку РПЕ. Регулювання його витрати здійснюється вентилем 21. На ділянці від нагрівальної ємності 18 до штуцера подачі його до приймальної камери пасивного потоку РПЕ контролюються наступні параметри: величина вакууму – вакуумметром 33, температура – термопарою з цифровим мультиметром 34, об’ємна витрата – лічильником об’ємної витрати 35. [521]

Після виходу з дифузора змішаний потік потрапляє в сепаратор 22, де розділяється на парову та рідку фази. Парова фаза через трубопровід викидається у довкілля, а рідка фаза по трубопроводах зливається у ємність 8, з якої насосом 9 відкачується для наповнення нагрівальних ємностей 2 і 18 або охолодження робочої рідини активного потоку у теплообміннику 17. Вентиль запірної арматури 24 служить для відкриття або закриття зливу рідкої фази із сепаратора.

Під час проходження потоку через РПЕ виконується вимірювання тиску і величини вакууму манометрами і вакуумметрами 29. Під час дослідження параметрів робочого струменя пари для вимірювання імпульсу (сили реакції) використовувалися цифрові ваги 23. [521]

Експериментальна модель РПЕ (рис. 2.43) виконана плоскопаралельною плоска і має ширину проточної частини 4 мм, виготовлена з органічного скла (поліметилметакрилат).

Цифровий мультиметр Mastech M-838 і термопара TR-01A, який використовували для вимірювання температури, має середнє значення систематичної похибки <1,5% при визначенні абсолютного значення тиску нагнітання. Гранична похибка вимірювання температури термопарами хромель-копель в комплекті з мультиметром класу 0,4 не перевищує 1°С. Максимальна

похибка вимірювання масових витрат за даними калібрувальних випробувань становить 3%. Стандартні манометри класу 0,4 вимірюють статичний тиск.

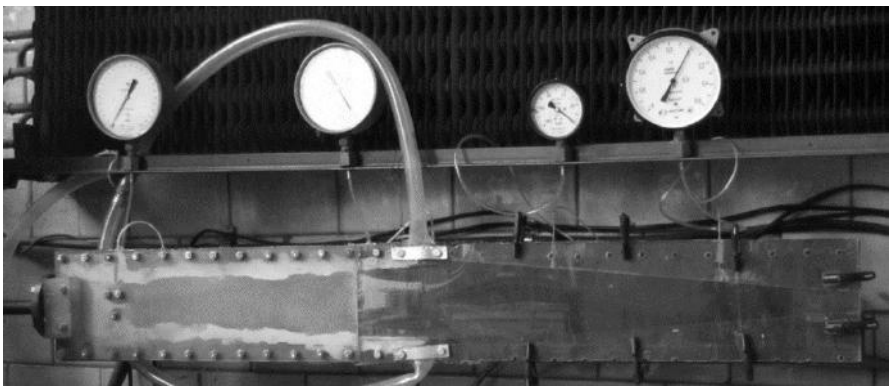


Рисунок 2.43 – Загальний вигляд плоскопаралельної моделі РПЕ (з конічною камерою змішування без дифузора)

В результаті дослідження отримано розподіл тисків і швидкостей робочих середовищ активного і пасивного потоків в проточній частині РПЕ. Похибка вимірювання не перевищує 5% з довірчою ймовірністю 0,95, що допустимо для технічних експериментів. Причому подібна точність вимірювань була досягнута в роботах інших дослідників.

Швидкість у певних точках визначається опосередковано шляхом вимірювання тиску, пульсації струменя та геометричних параметрів сопла.

4. Ексергетичний метод аналізу вакуумного агрегату на базі рідинно-парового ежектора

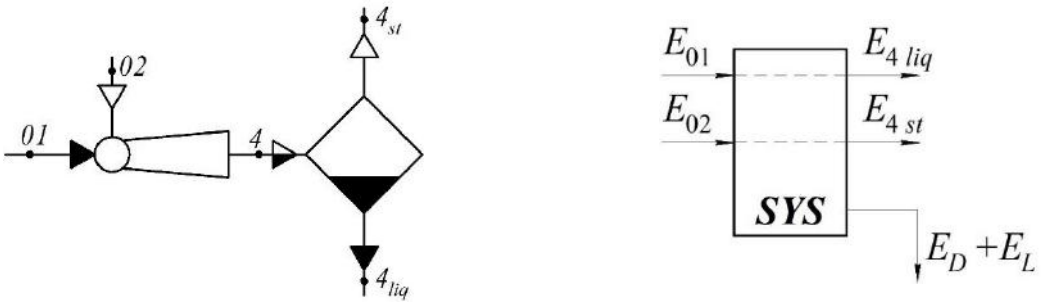
Для оцінювання ефективності застосування нової техніки та для модернізації існуючих систем доцільно застосовувати ексергетичний метод термодинамічного аналізу, який був запропонований Дж. Тсатсаронісом [522]. Це сучасний засіб оцінювання ефективності термомеханічних систем, який спрощує визначення сумарної втрати виробленої та витраченої роботи внаслідок необоротності процесів у розглядуваній системі. Основним критерієм оцінки досконалості системи є ексергетична ефективність (ε_{ex}), яка визначається за формулою

$$\varepsilon_{ex} = 1 - \frac{summary\ losses}{expended\ energy}. \tag{2.63}$$

Для системи «рідинно-паровий ежектор + сепаратор» (рис. 2.44), формулу для ексергетичної ефективності можна записати згідно з [523] у вигляді:

$$\varepsilon_{ex\ LVE+S} = \frac{E_{4\ st} - E_{02}}{E_{01} - E_{4\ liq}}. \tag{2.64}$$

де E_{01} і E_{02}– ексергія на вході в РПЕ активного потоку і пасивного потоку (насиченої пари) відповідно; $E_{4\ liq}$ і $E_{4\ st}$ – ексергія на виході з сепаратора рідкої та парової фаз відповідно.



a) b)

Рисунок 2.44 – Система «РПЕ + сепаратор» схема системи (a) та схема ексергетичних перетворень (b)

Після ексергетичних перетворень, з урахуванням формули (6), будемо мати

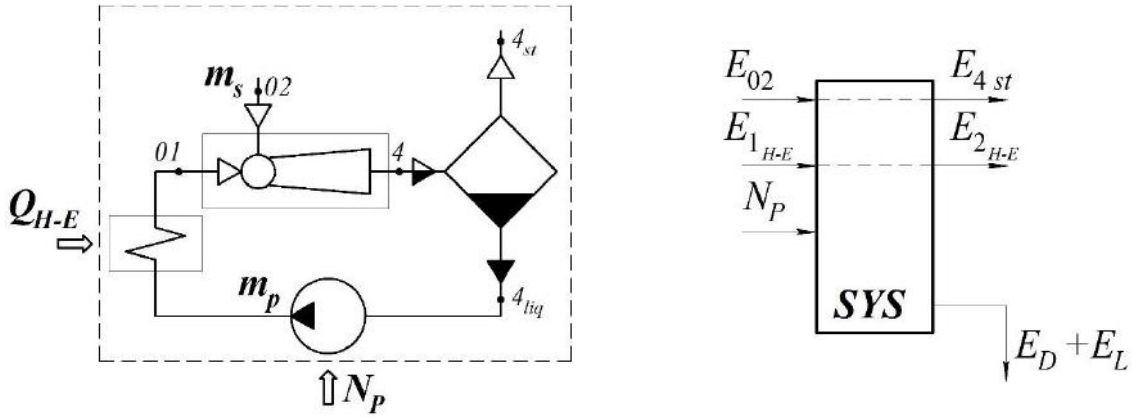
$$\varepsilon_{ex\ LVE+S} = u \cdot \frac{\psi_4 \cdot (e_{4\ st} - e_{02})}{e_{01} - e_{4\ liq}}. \tag{2.65}$$

де e_{01} і e_{02}– питома ексергія на вході в РПЕ активного потоку і пасивного потоку (насиченої пари) відповідно; $e_{4\ liq}$ і $e_{4\ st}$ – питома ексергія на виході з сепаратора рідкої та парової фаз відповідно.

Аналогічно запишемо формулу ексергетичної ефективності для системи «вакуумний агрегат» (рис. 2.45):

$$\varepsilon_{ex\,VU} = \frac{E_{4\,st} - E_{02}}{N_P + E_{Q_{H-E}}} = \frac{E_{4\,st} - E_{02}}{N_P + \left(E_{1_{H-E}} - E_{2_{H-E}}\right)}. \quad (2.66)$$

де N_P – потужність циркуляційного насосу; $E_{Q_{H-E}}$ – ексергія потоку теплоносія в теплообміннику; $E_{1_{H-E}}$ і $E_{2_{H-E}}$ – ексергія потоку теплоносія на вході та на виході з теплообмінника відповідно.



a) b)

Рисунок 2.45 – Система «РПЕ + сепаратор» схема системи (a) та схема ексергетичних перетворень (b)

Після ексергетичних перетворень, будемо мати

$$\varepsilon_{ex\,VU} = \frac{m_s \cdot (e_{4\,st} - e_{02})}{N_P + m_{H-E} \cdot \left(e_{1_{H-E}} - e_{2_{H-E}}\right)}. \quad (2.67)$$

де m_{H-E} – масова витрата потоку теплоносія в теплообміннику; $e_{1_{H-E}}$ і $e_{2_{H-E}}$ – питома ексергія потоку теплоносія на вході та на виході з теплообмінника відповідно.

Результати дослідження впливу паровмісту у змішаному потоці на ефективність вакуумного агрегату на базі рідинно-парового ежектора

На рис. 2.46 наведено графік розподілу тиску по довжині проточної частини РПЕ з різною геометрією відповідно до рис. 2.41.

З рис. 2.46 видно, що в РПЕ з циліндричною або конічною камерою змішування без дифузору на виході будуть менші значення тисків, які знаходяться на рівні p_4 = 0,1–0,12 *МПа*. Відповідно і ступінь підвищення тиску пасивного потоку буде меншою, що призводить до додаткового навантаження на циркуляційний насос, якому необхідно забезпечити тиск на вході в РПЕ p_{01} = 0,4 *МПа*.

Для РПЕ з циліндричною або конічною камерою змішування та дифузором p_4 = 0,22–0,25 *МПа*.

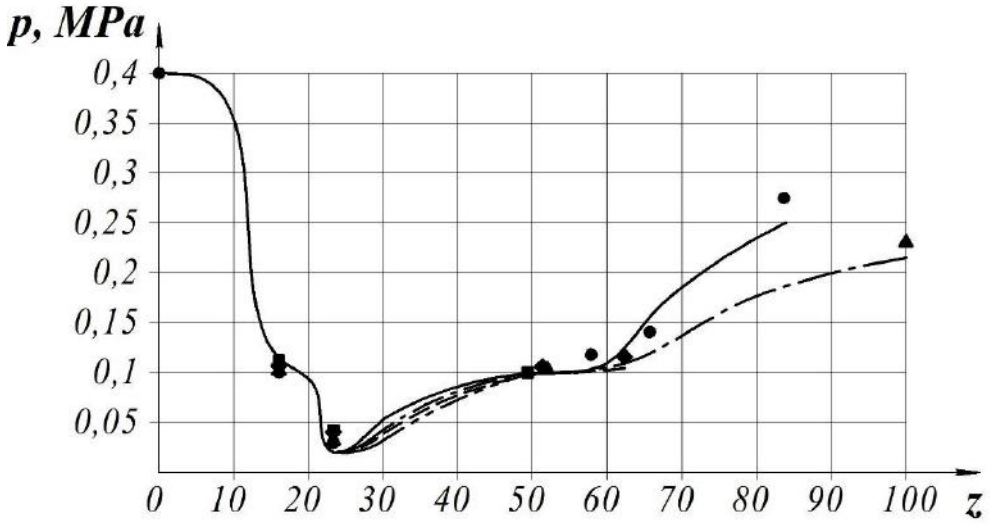


Рисунок 2.46 – Розподіл тиску по довжині проточної частини РПЕ: результати числового дослідження: —— – (fig. 1, a); - - - - – (fig. 1, b); - · - · - – (fig. 1, c); - · · - · · - – (fig. 1, d); експериментальні дані: ● – (fig. 1, a); ◆ – (fig. 1, b); ▲ – (fig. 1, c); ■ – (fig. 1, d)

Також, за результатами експериментальних досліджень і розрахунками за формулами (2.58) і (2.63) одержимо коефіцієнт інжекції для РПЕ без дифузору становить u = 0,03–0,05, а з дифузором – u = 0,07–0,12. Таким чином, РПЕ з дифузором відкачують більшу кількість пасивного потоку за одиницю часу, тобто мають в середньому на 37,5 % більшу продуктивність.

На рис. 2.47 наведено графік розподілу масового паровмісту по довжині проточної частини РПЕ з різною геометрією відповідно до рис. 2.41.

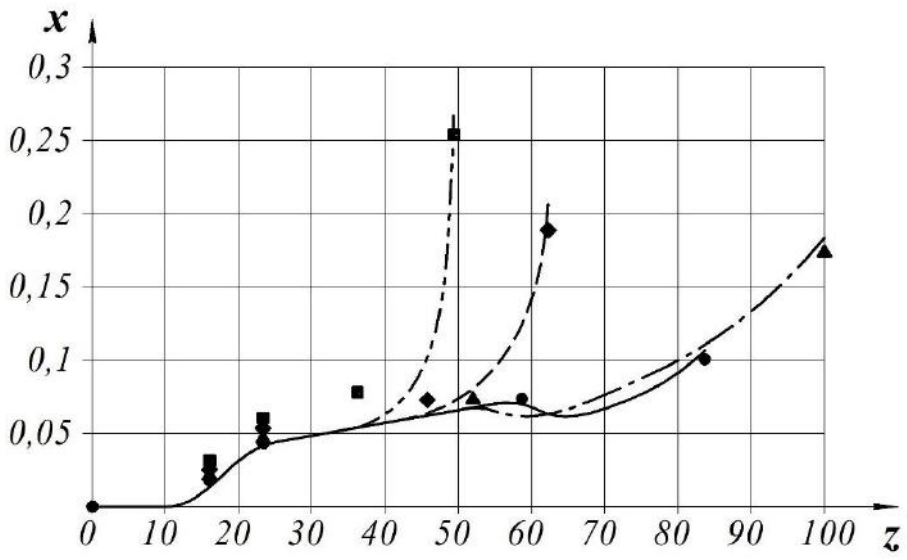


Рисунок 2.47 – Розподіл масового паровмісту по довжині проточної частини РПЕ (позначення аналогічно рис. 2.46)

З рис. 2.47 видно, що в РПЕ з циліндричною або конічною камерою змішування без дифузору на виході будуть значно більші (x_{4max} = 0,271), ніж у РПЕ з дифузором (x_{4max} = 0,127). Провівши розрахунки за формулами (2.57) і (2.61), можна визначити ступінь перевиробництва пари. Для РПЕ без дифузору він становить ψ_4 = 1,517–2,273, а для РПЕ з дифузором ψ_4 = 1,118–1,426. Згідно з формулою (2.60), для РПЕ без дифузору величина m_{loss} буде більша, тому необхідно буде повертати в цикл більшу кількість води для забезпечення умови $m_p = const$.

На рис. 2.48 наведено узагальнену теоретичну залежність ступеня перевиробництва пари та коефіцієнта інжекції від масового паровмісту в пасивному потоці на вході до РПЕ.

З рис. 2.48 видно, що зі збільшенням масового паровмісту в пасивному потоці на вході до РПЕ зростає коефіцієнт інжекції, але зменшується перевиробництво пари в робочому процесі.

Експериментальні показники ефективності РПЕ та вакуумного агрегату на його базі наведено на рис. 2.49.

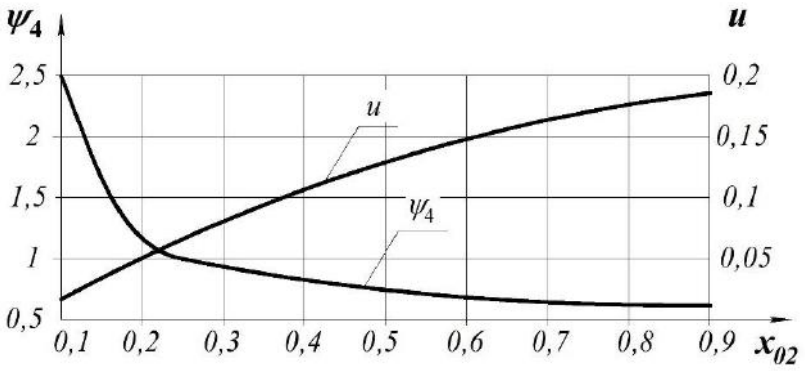


Рисунок 2.48 – Залежність ступеня перевиробництва пари та коефіцієнта інжекції від масового паровмісту в пасивному потоці на вході до РПЕ

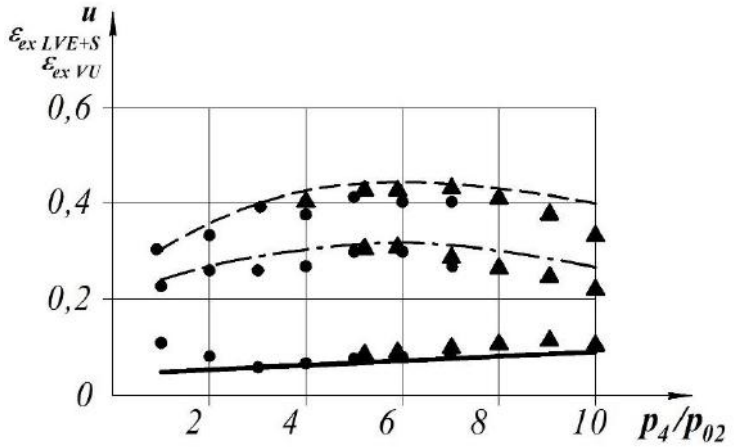


Рисунок 2.49 – Залежність досяжних показників ефективності РПЕ від ступеня підвищення тиску пасивного потоку [521]:
результати числового дослідження: —— – u; - - - - – $\varepsilon_{ex\ LVE+S}$; - · - · - – $\varepsilon_{ex\ VU}$;
експериментальні дані: ● – РПЕ з циліндричною камерою змішування;
▲ – РПЕ з конічною камерою змішування

Ефективність РПЕ за результатами експерименту визначається за даними прямих вимірювань і обробленням експериментальних даних.

Обговорення доцільності проведення досліджень та їх важливість для проектування нових вакуумних агрегатів та модернізації існуючих

Оцінюючи одержані результати числового та експериментального дослідження впливу перевиробництва пари в рідинно-паровому ежекторі на ефективність вакуумного агрегату, можна виділити кілька його суттєвих переваг. По-перше, застосовуючи РПЕ, ми отримуємо можливість реалізувати принципово новий цикл перетворення енергії, в якому генерація пари відбувається всередині робочого процесу. Це не потребує додаткового устаткування та ускладнення технологічної схеми установки. По-друге, застосування води як робочого середовища активного потоку підвищує економічність та екологічну безпеку пропонованого агрегату.

Були виявлені наступні особливості. Для ступеня підвищення тисків пасивного потоку $p_4/p_{02} < 4$ може бути застосований РПЕ з циліндричною камерою змішування та дифузором, а при $p_4/p_{02} > 4$ – з конічною камерою змішування та дифузором. Це пов’язане з часом, за який відбувається змішування робочих середовищ активного і пасивного потоків і завершеністю процесів тепло- і масообміну між фазами при різних тисках і температурах.

Проведені дослідження і наведені результати дозволяють уникнути таких проблем завдяки вибору геометрії проточної частини, яка найбільше підходить за початковими параметрами робочих середовищ активного і пасивного потоків. Саме це дозволило отримати такі показники ефективності.

Найбільш близькими по конструкції до пропонованого типу апаратів є пароструминні ежектори з робочим середовищем – водяна пара. Але вони, як правило, є багатоступеневими та мають сумарний ККД на рівні 2–5 %. Така низька ефективність зумовлена тим, що в одному ступені пароструминного ежектора можна створити перепад тисків лише у 2–3 рази. У рідинно-паровому ежекторі такий перепад є на рівні 8–10.

Обмеженнями в області застосування даного виду ежекторів можна вважати значення вакууму на вході у сопло пасивного потоку, які можливо досягти на рівні 10–15 кПа. Щоб отримати менші значення цього тиску, необхідно використовувати форвакуумні насоси (бустерні або молекулярні).

Дане дослідження можна продовжити і в подальшому працювати над підвищенням ефективності робочого процесу РПЕ шляхом профілювання

дифузорної частини сопла активного потоку. Проте для цього необхідно вдосконалити математичну модель, яка б враховувала різну геометрію сопла та провести додаткові експериментальні дослідження.

2.3 Висновок

Встановлено, що використання робочого файлу «Критичні частоти ротора» системи комп'ютерної алгебри MathCAD є більш доцільним для вирішення задач розрахунку динаміки ротора з використанням кінцевих балкових елементів. Це пов'язано з можливістю безпосереднього розгляду (в довільній аналітичній формі) залежності жорсткості підшипників від частоти обертання ротора. Крім того, розрахунок із застосуванням запропонованого методу на порядок скорочує підготовчий і машинний час порівняно з чисельним моделюванням у програмному забезпеченні ANSYS без втрати точності обчислень. Отримані результати можуть бути використані в подальшому для дослідження динаміки роторів відцентрових машин.

В роботі модернізовано відцентровий насос СРН 600-35 для водопостачання промислового контуру атомних електростанцій. Цей проект відповідає національним стандартам щодо правил і норм в атомній енергетиці згідно вимог ДП «НАЕК «Енергоатом», а саме СОУ НАЕК 158:2020, 59:2020,160:2020 та ПНАЕ Г-7-002-86.

Для забезпечення вібраційної надійності розробленого насоса застосовано підхід ідентифікації параметрів разом із кінцево-елементним аналізом та аналітичним моделюванням. У результаті оцінено еквівалентну масу та жорсткість роторної системи. Розроблено математичну модель динаміки ротора з урахуванням сил інерції, жорсткості, демпфування, циркуляції та внутрішнього тертя. Оскільки робоча швидкість 157 рад/с є значно меншою за першу критичну частоту 702 рад/с, відхилення від резонансу дорівнює 347%. Тому динамічне балансування ротора слід проводити згідно з міжнародним стандартом ISO 1940-1:2003. Крім того, перші три власні частоти були розраховані чисельно за допомогою програмного забезпечення ANSYS та розробленого операційного файлу «Критична частота ротора» системи комп'ютерної алгебри MathCAD.

Кожна програма базується на методі скінченних елементів. Відносна різниця між першими двома власними частотами не перевищує 4%.

Розроблено параметричну ідентифікацію дискретних мас для переходу від скінченно-елементної моделі вільних коливань колінчастого вала до дискретно-масової. Запропонований підхід спрямований на вдосконалення моделей коливань колінчастого вала з точки зору точності аналізу чисельного моделювання та надійності існуючих аналітичних методів. Зокрема, досягнута мета розробки уточненої дискретно-масової математичної моделі вільних і вимушених коливань колінчастого вала дозволяє усунути наступні наукові прогалини в області динаміки ротора. Критерієм надійності запропонованої моделі є найкращий збіг власних частот і відповідних форм мод вільних коливань колінчастого вала. Нарешті, запропонована модель дозволяє розглянути інші сили, що виникають у шарі масла між ротором і статором і під час можливого контакту ротор-статор у нерозрахункових або перехідних режимах.

Відповідно до розробленого алгоритму на основі чисельного розрахунку дискретних мас колінчастого вала 3LD-1005020 дизеля ММ3-3LD оцінено точність розробленої математичної моделі. Зокрема, для максимальної робочої частоти 4000 об/хв і двомасової моделі відносна похибка визначення 1-ї критичної частоти 584 Гц не перевищує 6 %.

Виконано опис та аналіз традиційної конденсаційної установки на базі двоступеневого пароструминного ежектора з виявленням основних недоліків даної схеми.

За результатами термодинамічного розрахунку було виявлено, що застосування рідинно-парового ежектора, який працює за принципом струминної термокомпресії, є перспективним у конденсаційних установках парових турбін. Також він може бути застосований разом з рідинно-кільцевим вакуумним насосом як форвакуумний агрегат.

За результатами ексергетичного аналізу визначено ексергетичну ефективність рідинно-парового ежектора у складі конденсаційної установки та доцільність його застосування для паротурбінних установок. Ексергетична

ефективність нового устаткування становить 0,713, що в 2,3 рази вище, ніж у традиційних. Додатково можна збільшити ефективність на 17% шляхом застосування даного ежектора як форвакуумного разом з РКВН. Такі показники досягаються за рахунок переходу на менші ступені підвищення тиску в РПЕ, що призводить до зменшення теплових навантажень на допоміжне устаткування схеми, зниження ексергії потоку палива і підвищення загальної ефективності.

За результатами проведених числових та експериментальних досліджень одержали, що в ежекторі з циліндричною або конічною камерою змішування з дифузором ступінь перевиробництва пари складає ψ_4 = 1,4, а без дифузору – ψ_4 = 2,3. Наявність дифузору сприяє більшій степені завершеності процесу змішування та отримання на виході з ежектора потоку двофазної парокрапельної дрібнодисперсної структури. Ступінь перевиробництва пари при цьому досягає оптимальних значень на рівні ψ_4 = 1,1–1,25.

3 МАШИННЕ НАВЧАННЯ БОРТОВОЇ СИСТЕМИ АВТОНОМНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ З ВИКОРИСТАННЯМ 3D-МАКЕТІВ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ

3.1 Сучасний стан розроблення автономних безпілотних літальних апаратів

Надання безпілотному літальному апарату (далі – БПЛА) властивості автономності безпосередньо пов'язано із вирішенням головної проблеми штучного інтелекту – це наближення когнітивних можливостей штучного інтелекту до природнього, притаманного людині при формуванні та прийнятті класифікаційних рішень. Не зважаючи на активний технологічний розвиток створити в повній мірі автономну бортову систему БПЛА для розпізнавання наземних, повітряних та надводних об'єктів за оптико-електронними, інфрачервоними та радіолокаційними каналами спостереження на даний момент часу все ще не вдалося через науково-методологічні ускладнення, обумовлені довільними початковими умовами формування зображень наземних об'єктів, перетином класів розпізнавання, що характеризують зображення наземних об'єктів, в просторі ознак розпізнавання, багатовимірністю словника ознак і алфавіту класів розпізнавання та впливом неконтрольованих факторів, пов'язаних, наприклад, із зміною погодних умов, освітленості, маскуванням тощо. Тому під терміном «автономність», як правило, розуміється реалізація певної інтелектуальної компоненти, яка здатна приймати рішення у рамках чітко визначеної задачі.

У технологічному аспекті під автономністю БПЛА доцільно розуміти наявність інтелектуальної складової, що дозволяє за результатами машинного навчання будувати вирішальні правила з метою прийняття при виконанні польотного завдання класифікаційних рішень і навіть самостійно розробляти можливі варіанти дій у відповідь на нові проблеми.

Враховуючи функціональні можливості БПЛА запропонуємо таке визначення послідовних рівнів автономності:

1) Перший рівень автономності БПЛА забезпечує наявність на борту автопілота, зв’язаного з глобальними мережами позиціонування типу GPS.

2) Другий рівень автономності – здатність бортової системи БПЛА розпізнавати наземні, надводні, підводні та повітряні об’єкти за побудованими за результатами машинного навчання вирішальними правилами і передавати відповідну інформацію за криптозахищеним каналом на наземну станію керування (НСК).

3) Третій рівень автономності – здатність бортової системи БПЛА самонавчатися розпізнпавати наземні надводні, підводні та повітряні об’єкти.

4) Четвертий рівень – здатність БПЛА за результатами класифікаційних рішень виконувати автономно окремі функції польотного завдання, наприклад, для розвідувально-ударного БПЛА пуск і націлення боєприпасу безпосередньо з безпілотника, для безпілотника-доставщика вантажу самостійна посадка у визначеному місці тощо.

5) П’ятий рівень – здатність БПЛА здійснювати автономну відеонавігацію за наземними природними та інфраструктурними орієнтирами з наперед відомими географічними координатами без зв’язку автопілоту з GPS.

6) Шостий рівень – здатність БПЛА виконувати завдання в режимі астронавігації без зв’язку автопілоту з мережею GPS.

Розглянемо основні тенденції розвитку сучасних автономних БПЛА.

Повітряні сили США сумісно з приватною компанією “Kratos” завершили випробування своєї спільної розробки реактивного БПЛА на базі літака «XQ-58A Valkyrie» (рис. 3.1) [524]. Із відкритих джерел відомо, що БПЛА є частково автономним, як мінімум, було зазначено серед специфічних функцій: можливість автоповернення цього габаритного пристрою до точки зльоту. Теоретично це робить його стійким до впливу засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) зі сторони ворога, адже навіть при втрачанні зв’язку з НСК безпілотник все рівно здатний повернутися на базу. Перша партію планується виготовити вже в 2023 році.

Рисунок 3.1 – БПЛА «XQ-58A Valkyrie»

Відомо, що такі само властивості автономності має американський військовий БПЛА MQ-9 «REAPER». Серед добре відомих та розповсюджених воєнних БПЛА варто відмітити БПЛА «Bayraktar Mini-UAV» (рис. 3.2) від компанії «Baykar» [525].

Рисунок 3.2 — Запуск Bayraktar «Mini UAV»

Для автоматичної відеонавігації безпілотник може використовувати опорні точки, які прив’язані до геоінформаційних орієнтирів на місцевості, а для запобігання впливу засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) застосовуються алгоритми автоповернення та згадана відеонавігація. У рамках бойових дій цей БПЛА продемонстрував точність визначення цілі майже до 10 метрів, що є надзвичайним результатом враховуючи висоту його польоту.

Серед представників воєнних БПЛА до другого рівня автономності за нашою класифікацією можна віднести, наприклад, дрон-камікадзе «STM Kargu» (рис. 3.3) турецького виробництва [526]. Він оснащений бортовою системою розпізнавання (БСР) зображень в реальному часі. За допомогою машинного навчання безпілотник може класифікувати як статичну так й рухому ціль. У даному випадку така автономність породжує ряд морально-етичних питань. Так, наприклад, згідно з доповіддю групи експертів ООН, цей БПЛА в Лівії в 2020 році сам без наказу ліквідував людину під час бойових дій, що призвело до обговорення цієї проблеми. Основним шляхом забезпечення для цивільного населення безпечності застосуванні військових автономних БПЛА є підвищення функціональної ефективності машинного навчання, основною складовою якої є достовірність розпізнавання наземних та інших об’єктів. Для вирішення цієї проблеми актуальними задачами є [527]:

– розроблення нових методів машинного навчання в рамках функціонального підходу до моделювання когнітивних процесів, притаманних людині при формуванні та прийнятті класифікаційних рішень;

– розроблення апаратно-програмного інструментарію інформаційного синтезу БСР автономних БПЛА, що дозволить наблизити умови машинного навчання до реальних.

Рисунок 3.3 – STM «Kargu»

Серед вітчизняних безпілотників можна відмітити Raybird-3 (рис 3.4), розроблений в 2016 році компанією «Скаетон» [528]. Апарат керується оператором НСК і здатний пролетіти автономно до 2.5 тис. кілометрів, за попередньо прокладеним маршрутом. Комплекс керування здатний вести декілька апаратів і декілька наземних станцій можуть керувати безпілотником. Таким чином вдається створити комунікаційну мережу в межах якої БПЛА зможе вільно пересуватися.

Рисунок 3.4 – Український «Raybird-3» на станції запуску

Технічні характеристики розглянутих БПЛПА зазначені в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Порівняння технічних характеристик БПЛА

Назва апарату	Розмах крила	Макс. висота польоту	Тривалість польоту	Крейсерська швидкість	Макс. злітна маса	Радіус польоту
XQ-58A Valkyrie	6700мм	13км	-	882 км/год	2.7 кг	3.9 км
STM Kargu	600мм	2.8 км.	30 хв.	72 км/год	7.06 кг	5 км.
Bayraktar Mini-UAV (Б)	1900мм	3.6 км.	> 1 год.	70 км/год	5 кг	15 км.
Raybird-3	2960мм	3.5 км.	18-28 год.	110 км/год	23 кг.	1 тис. км.

У бойових умовах виникає необхідність створення захищеного каналу зв’язку між БПЛА та НСК [529]. При цьому він не повинний впливати на оперативність роботи, оскільки воєнні безпілотники, в преважній більшості,

здійснюють обробку отриманої інформації у реальному часі. Крім того, від БСР вимагається не лише забезпечити оперативність прийняття рішення, а ще й бути достатньо адаптованою до довільних змін на місцевості. Цього можна досягти реалізацією двох компонент:

1) інваріантність вирішальних правил інтелектуальної системи, що, теоретично, дозволить підвищити достовірність прийняття рішень;

2) перенавчання автономної БСР, що дозволить адаптуватися її як до зміни умов спостереження, так і алфавіту класів розпізнавання;

Інтелектуальне програмне забезпечення сучасних безпілотників можливо умовно розділити на наступні класи:

- ***Псевдо інтелектуальні системи.*** До цієї групи слід віднести усі алгоритми обробки зображення, які дозволяють, наприклад, виділити об’єкт або його контури, але не ідентифікувати його. Сюди ж варто віднести різного роду попередження про набрання максимально можливої висоти, ймовірне скоре втрачання зв’язку з пристроєм . По своєму призначенню це методи, які спрощують роботу оператору, але самі не приймають жодних рішень.

- ***Автономні компоненти.*** Це реалізація деяких складових автономної системи: автостабілізація, адаптація до зміни погодних умов, автоматична посадка або зліт пристрою тощо.

- ***Автономні системи.*** До цієї групи варто включити усі алгоритми прийняття рішень реалізовані при використанні БПЛА. Тобто, це не обов’язково повинні бути повністю автономні пристрої, але, як мінімум, здатні за наявної інформації робити деякі висновки, а при необхідності виконувати роботу самостійно. Наприклад, автокорегування артилерійського вогню, трекінг та фокус на цілі, автоповернення, автоматична класифікація об’єктів в кадрі, прогнозування за наявною геоінформацією тощо.

Як приклад одного з автономних компонентів розглянемо згідно праці [530] автоматичну посадку безпілотника Saker 4 UAV (рис. 3.5) з наступними технічними властивостями: вага – 25 кг, розмах крила – 3.75 м., максимальна швидкість польоту – 120 км/год, максимальна висота – 5 км.

Рисунок 3.5 – Планер Saker 4 UAV

У запропонованій реалізації потокове відео розбивається на упорядкований набір фреймів на кожному з яких знаходять, так звану, зону інтересу, у даному випадку – це злітно-посадкова смуга. Тим не меш, цього не достатньо для здійснення посадки, адже розпізнані ділянки включають в себе зайві об’єкти, які заважають скоректувати приземлення. Тому, після класифікації зони інтересу, виконується додатковий етап обробки зображення з пошуком країв об’єкту, що дозволяє вірно розрахувати положення злітно-посадкової смуги для автоматичної посадки БПЛА. Схематично увесь процес зображено на рис. 3.6 [525].

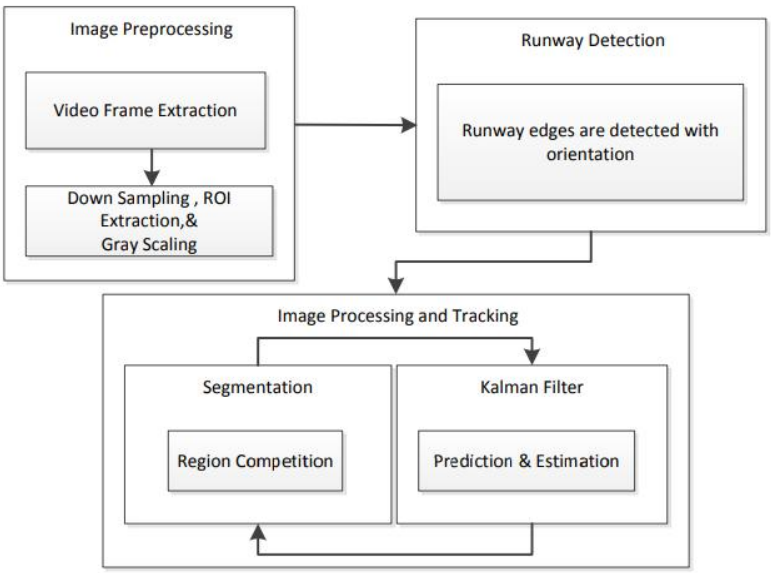


Рисунок 3.6 – Схема процесу функціонування автономної бортової системи розпізнавання зльотно-посадкової смуги

Відомо, що будь-яку злітно-посадкову смугу можна описати двома паралельними лініями. Проте зображення з борту БПЛА отримується з деякою деформацією перспективи, тому подібна апроксимація не можлива. Але відомо, що злітна полоса добре контрастує з оточенням, таким чином задача машинного навчання зводиться до пошуку таких відрізків $d_i, i = 1, \dots 4$, які описують мінімальну кількість інформації поза зоною інтересу, візуально це показано на рисунку 3.7.

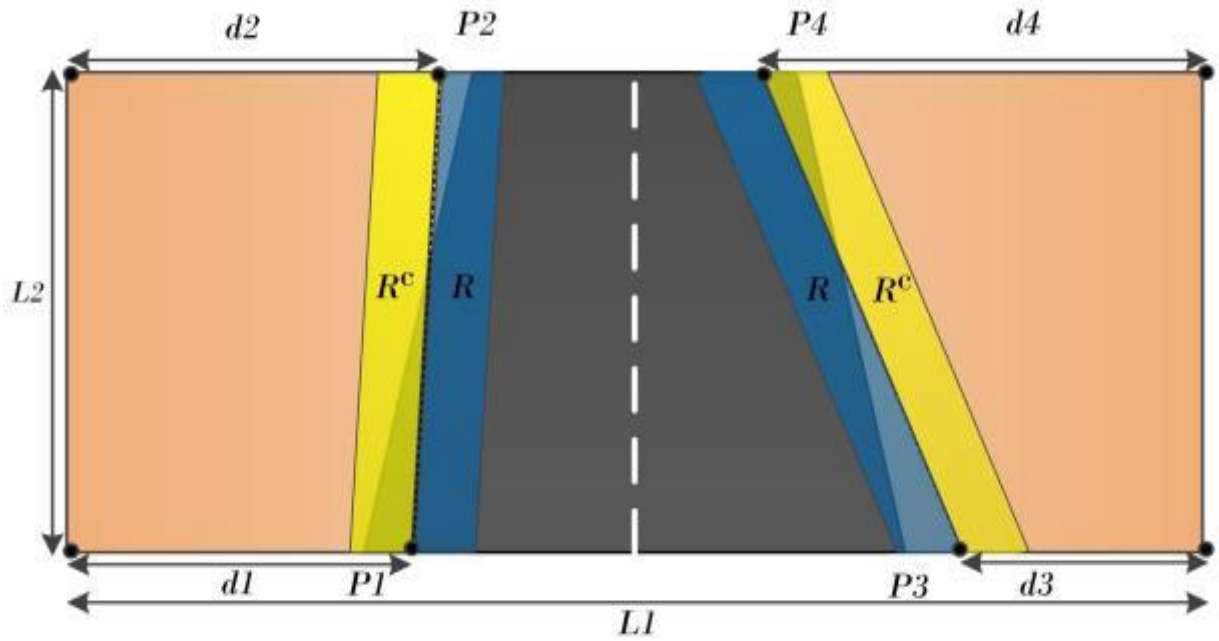


Рисунок 3.7 – Апроксимація злітно-посадкової смуги

Формалізовано задачу оптимізації країв об’єкту можна подати наступним чином. Припустимо, що дві сусідні ділянки R та R^c однакові за площею. Необхідно знайти таке їх положення, щоб вони мали максимально різне значення усередненої яскравості. Нехай, зображення буде позначатися $I: \Omega \to \Re^k$, де k = 3 для кожної компоненти RGB. У свою чергу R, $R^c \subset \Omega$ і визначенні як сусідні регіони (рис. 3.7). Усереднене значення яскравості позначаються як $u, v \in \Re^k$, тоді

$$u = \frac{1}{|R|}\int_R I(x)dA,\ v = \frac{1}{|R^c|}\int_{R^c} I(x)dA, \tag{3.1}$$

де dA - елемент обраної області.

Для визначення оптимальної позиції відрізків необхідно мінімізувати наступну цільову функцію:

$$E(d_1, d_2, d_3, d_4) = -\frac{1}{2}|u - v|^2 \quad (3.2)$$

Існують класичні методи визначення країв об'єкту, які базуються на обчисленні часткових похідних, але вони дуже чутливі, до шумів та положення об'єкту у кадрі. Як зазначалося раніше специфіка розробленої бортової системи передбачає деяку деформацію початкового зображення, тому потрібно або забезпечити інваріантність вирішальних правил, як це зробили автори роботи [2], або виконувати афінні перетворення. Іншою не менш важливою, специфікою роботи БСР є те, що прийняття рішень повинно відбуватися у реальному часі. Тому потрібно забезпечити систему достатнім рівнем оперативності.

Згідно з рисунком 3.7 пряма, що описує край зони інтересу, може бути відхилена відносно центру рецепторного поля не більше ніж на $[-\theta_{min}, \theta_{max}]$, $\theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$, тоді цільова функція (3.2) прийме вигляд

$$E'(x, \theta) = -\frac{1}{2}\left(u'(x, \theta) - v'(x, \theta)\right)^2 \quad (3.3)$$

На рисунку 3.8. показаний приклад визначення країв об'єкту інтересу з графіком залежності цільової функції (3.3).

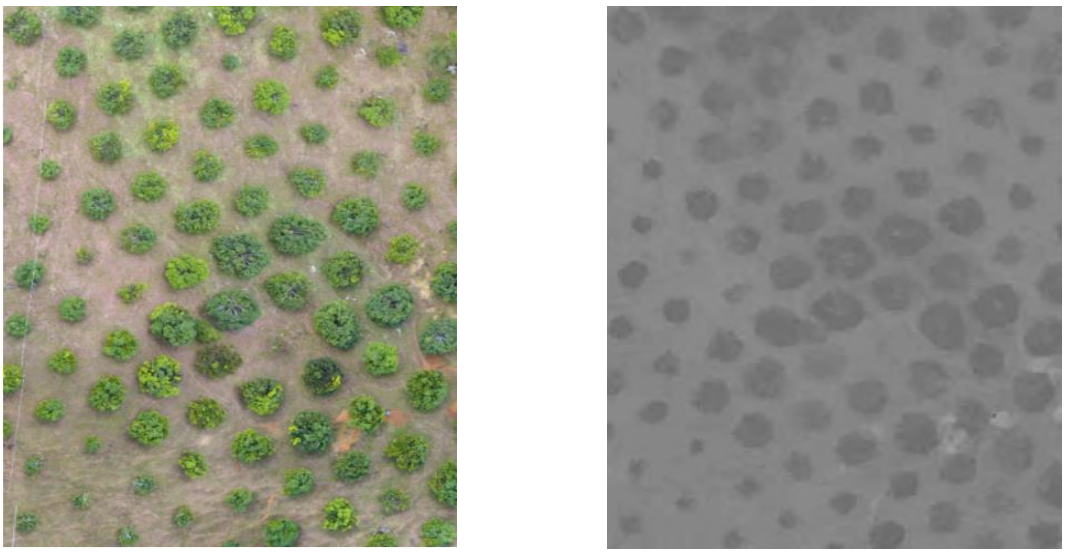
У праці [355] автори використовують ще декілька кванторів оптимізації для підвищення інваріативності розробленої моделі при розпізнаванні злітно-посадкової смуги. А також зазначають усі технічні можливості використаного ними БПЛА, бо саме вони впливають на вибір алгоритмів машинного навчання.

На прикладі праць [531, 532] показаний варіант використання БПЛА для ідентифікації об'єктів інтересу та визначення найближчих сусідів між ними в агрономії. Практична цінність розробки полягає у тому, що безпілотник може

самостійно виконувати контроль процесу зростання агрокультури та визначати її стадію росту. Автори праці [533] розглядають це питання на прикладі плантації мангових дерев.

Рисунок 3.8 – Обрання найкращого кандидата

Як основний інструмент була використана безкоштовна бібліотека аналізу зображень OpenCV. На першому кроці був обраний найкращий кольоровий простір з усіх можливих. Необхідно, щоб при його використанні мангові дерева максимально сильно контрастували з фоном. Для отриманих зображень найкраще підійшов YCrCb (рис. 3.9).



а б

Рисунок 3.9 – Результат переходу від RGB до YCrCb: а – плантація в RGB спектрі; б – плантація в YCrCb;

Наступним кроком є сегментація зображення з подальшим виділенням крон дерев. Для цього був використаний метод адаптивного гаусівського порогу, для Cr спектру. Принцип роботи алгоритму достатньо простий, він виокремлює найтемніші ділянки зображення від фону. Для цього використовується деяке порогове значення пікселя, яке визначається як зважена сума його сусідів. Якщо яскравість менша порогу, то припускаємо, що цей піксель належить дереву. Для позбавлення шуму був використаний фільтр ерозія з бібліотеки OpenCV, який зменшує область світлого зображення. Тим самим виділяючи і збільшуючи темні ділянки. На цьому етапі, використавши лише стандартні методи обробки зображення, вже вдалося сегментувати об’єкти. У нашому випадку це мангові дерева. Звісно, що система не здатна класифікувати результат сегментації і визначити, що саме вона бачить, але у рамках цього завдання це і не потрібно. Задачею БПЛА є контроль над ростом мангових дерев при заданих і не змінних умовах функціонування БСР.

Наступним кроком потрібно визначити центри сегментованих об’єктів та поєднати їх в одну неперервну систему. Звісно, що якщо ми це зробимо напряму, то отримаємо результат, де кожен поєднаний з кожним. Тому нам потрібно оптимізувати цю карту, щоб об’єкти поєднувалися лише зі своїми найближчими сусідами. По-перше, слід формалізувати кожне сегментоване дерево. Нехай, усі вони будуть замінені колом з радіусом 30 пікселів для простоти подальшої роботи і візуального сприйняття, бо початково усі об’єкти мають довільні розміри. По-друге, центри кіл потрібно поєднати між собою у неперервну мережу. Для цього було використано перетворення Хафа, яке шукає точки, що знаходяться на одній умовній лінії та поєднує їх. Визначаємо, що на одній лінії може бути до 5 об’єктів, а відстані між ними можуть досягати понад 400 пікселів. Результатом роботи алгоритму є наступна карта (рис. 3.10).

Як видно з рисунку алгоритм знайшов занадто багато зв’язків для кожного з об’єктів, необхідно мінімізувати їх кількість. Для кожної точки окремо усі лінії об’єднують у групи, а потім усереднюють їх кут. Таким чином отримується результуюче зображення (рис. 3.11).

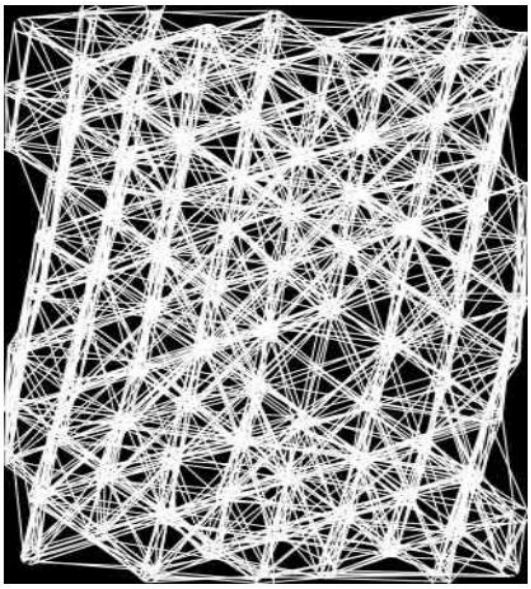


Рисунок 3.10 – Результат роботи перетворення Хафа

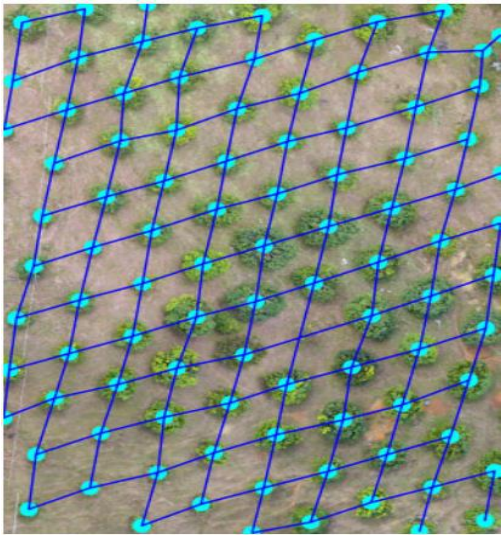


Рисунок 3.11 – Неперервна мережа із мангових дерев

Важливо відмітити, що достовірність розпізнавання наземного об’єктузалежить насамперед від специфіки вхідних даних. Універсального рішення для кожної подібної задачі не існує. У даному випадку вдалося сегментувати об’єкти на зображенні та поєднати їх в одну неперервну мережу. У подальшому, маючи результати сегментації за тривалий час, система може слідкувати за перебігом росту мангових дерев. Наприклад, через фіксування збільшення або зменшення об’єкту з часом.

Розглянута БСР не представляє кардинально новий підхід до проблеми розпізнавання наземних об’єктів. Тим не менш, за допомогою комплексного використання вже відомих методів вдалося розв’язати слабоформалізовану задачу. При цьому сама реалізація є достатньо гнучкою, адже вона може бути адаптована під різні умови використання.

Таким чином, сучасні інтелектуальні системи не можуть бути повністю автономними. Це пов’язано, насамперед, з наступними науково-методологічними проблемами машинного навчання:

– модальний характер більшості досліджень, що, звісно, становить, певну цінність, але є не придатним для практичного застосування;

– незавершеність теорії ефективного машинного навчання інтелектуальних систем.

Головний висновок із приведених прикладів полягає в тому, що при розробці БСР автономних БПЛА окрім методу машинного навчання з високою функціональною ефективністю необхідно використовувати максимальну кількість мета інформації про об’єкт дослідження. Одним із перспективних шляхів отримання такої мета інформації є формування вхідного інформаційного опису БСР автономного БПЛА з використанням 3D-макетів наземних об’єктів. Для реалізації машинного навчання з використанням 3D-макетів наземних об’єктів у проблемній науковій лабораторії інтелектуальних систем Сумського державного університету створено стенд-симулятор, який дозволяє розробляти, налагоджувати та верифікувати інформаційне, алгоритмічне та програмне забезпечення БСР автономного БПЛА. При цьому симулятор відтворює 3D-макети наземних об’єктів, рельєф відповідного регіону і моделює зміну кліматичних, сезонних і добових умов спостереження.

3.2 Формалізована постановка задачі інформаційного синтезу бортової системи автономного безпілотного літального апарату з використанням 3D-макетів наземних об’єктів

Розглянемо формалізовану постановку задачі інформаційного синтезу здатної навчатися БСР в рамках IEI-технології. Нехай задано алфавіт

$\{X_m^o \mid m=\overline{1,M}\}$ класів розпізнавання, що характеризують можливі наземні об'єкти. За оптико-електронним каналом БСР автономного БПЛА сформовано електронні зображення регіону з 3D-макетами наземних об'єктів спостереження. Шляхом зчитування інформації з рецепторного поля зображень сформовано вхідну тривимірну навчальну матрицю типу «об'єкт – властивість» $\| y_{m,\,i}^{(j)} \|, i=\overline{1,N},\ j=\overline{1,\,n}$, де N, n – кількість ознак розпізнавання та структурованих векторів ознак класів розпізнавання відповідно. Водночас рядок матриці $\{y_{m,\,i}^{(j)} \mid i=\overline{1,\,N}\}$ визначає j-у реалізацію, а стовпчик $\{y_{m,\,i}^{(j)} \mid j=\overline{1,\,n}\}$ – навчальну випадкову вибірку значень i-ї ознаки. Згідно з робочою гіпотезою IEI-технології вхідна навчальна матриця Y перетворюється на робочу бінарну матрицю X, яка способом допустимих перетворень у процесі машинного навчання адаптується до максимальної повної ймовірності прийняття правильних класифікаційних рішень. Тому в бінарному просторі Геммінга задамо множину $\{g_m\}$ структурованих векторів параметрів функціонування, що впливають на функціональну ефективність машинного навчання БСР. У подальшому такі параметри функціонування будемо називати параметрами машинного навчання. Вектор параметрів машинного навчання бортової системи розпізнавати структуровані вектори ознак класу розпізнавання X_m^o наведемо у вигляді структури [527]

$$g = < g_1,...,g_{\xi_1},...,g_{\Xi_1},\ f_1,...,f_{\xi_2},...,f_{\Xi_2} >,\ \ \Xi_1+\Xi_2=\Xi, \qquad (3.4)$$

де $< g_1,...,g_{\xi_1},...,g_{\Xi_1} >$ – генотипні параметри функціонування, що впливають на параметри розподілу реалізацій класу розпізнавання;

$< f_1,...,f_{\xi_2},...,f_{\Xi_2} >$ – фенотипні параметри функціонування, що впливають на геометрію контейнерів класів розпізнавання, відновлюваних в радіальному базисі простору ознак.

Водночас відомі обмеження на відповідні параметри машинного навчання [527]:

$$R_{\xi_1}(g_1,...,g_{\xi_1},...,g_{\Xi_1}) \le 0, \quad R_{\xi_2}(f_1,...,f_{\xi_2},...,f_{\Xi_2}) \le 0.$$

Необхідно:

1) визначити оптимальні значення параметрів машинного навчання $\{g_\xi^* \mid \xi = \overline{1, \Xi_1 + \Xi_2}\}$, що забезпечують максимум усередненого за алфавітом класів розпізнавання інформаційного критерію [527]

$$\overline{E}^* = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \max_{G_E \cap \{k\}} E_m^{(k)}, \qquad (3.5)$$

де $E_m^{(k)}$ – інформаційний критерій оптимізації параметрів машинного навчання бортової системи розпізнавати реалізації класу X_m^o, значення якого обчислено на k-му кроці машинного навчання;

G_E – допустима область визначення функції інформаційного критерію оптимізації, що далі називатимемо робочою областю;

$\{k\}$ – упорядкована множина кроків машинного навчання (відновлення контейнерів класів розпізнавання в радіальному базисі бінарного простору ознак);

2) для апріорно класифікованого нечіткого розбиття $\tilde{\Re}^{|M|}$ побудувати шляхом допустимих перетворень у субпарацептуальному бінарному просторі ознак розпізнавання Хеммінга оптимальне (тут і далі в роботі в інформаційному розумінні) чітке розбиття класів розпізнавання $\Re^{|M|}$, на основі якого сформувати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила; [527]

3) оскільки при своїй роботі БПЛА зазнає впливу зовнішніх факторів, які змінюють його положення, то необхідно забезпечити вирішальні правила інваріантністю до довільних початкових умов формування зображень наземних об’єктів. Для цього наділити БСР модулем, який комплексно оцінює точність розпізнавання об’єкту інтересу і якщо вона стає меншою деякого порогового значення, то необхідно адаптувати вхідний математичний опис.

На етапі екзамену для перевірки функціональної ефективності машинного навчання прийняти рішення про належність реалізації образу, що розпізнається, до одного з класів заданого алфавіту $\{X_m^o\}$. [527]

Таким чином, завдання інформаційного синтезу здатної навчатися БСР зводиться до оптимізації в процесі інформаційно-екстремального машинного навчання параметрів функціонування (3.4) за інформаційним критерієм (3,5) та прийняття в режимі екзамену класифікаційного рішення за побудованими на етапі навчання вирішальними правилами.

3.3 Формування вхідного інформаційного опису автономної бортової системи розпізнавання наземних об’єктів

Перед початком формування вхідного інформаційного опису було проведено аналіз специфіки предмету дослідження й умов функціонування БПЛА. При цьому всі об’єкти, які ідентифікує БСР були природнього та техногенного походження.

Безпосереднє моделювання 3Д-макету місцевості було розпочато з розмітки майбутньої карти. Звісно, що для її створення можна взяти реально існуючу територію та спробувати відтворити її у рамках симуляції, але слід враховувати, що для адекватного навчання та тестування БСР потрібна така місцевість, яка буде достатньо інформативною. Тобто матиме адекватну різноманітність об’єктів та особливостей ландшафту, але при цьому, на поточний момент часу, бажано забезпечити низький перетин ознак класів розпізнавання. Таким чином, щоб спростити класифікацію об’єктів для БСР, а в подальшому поступово ускладнювати місцевість та завдання, які ставляться перед БПЛА. У цьому і полягає головна ідея симулятору.

Враховуючи це, було прийняте рішення самостійно спланувати макет селища, яке б містило в собі усі необхідні об’єкти і при цьому було б достатньо зручним для ідентифікації з борту безпілотника. На рисунку 3.12 схематично зображено план майбутньої місцевості.

Для відтворення 3D-макету було обрано інструмент Unreal Engine 4 (UE4), який дозволяє створити інтерактивну карту достатніх для випробування

розмірів. Перше завдання, яке необхідно виконати при моделюванні ландшафту – це самостійне створення текстури поверхні майбутньої місцевості. При цьому UE4 дозволяє розробити її таким чином, щоб вона враховувала неоднорідність поверхні ландшафту, накладаючи на схили текстуру каменю.

Рисунок 3.12 – План місцевості

Це наддасть пагорбам та впадинам більш реалістичного вигляду, що буде помітно з борту безпілотника. Окрім цього, згідно з ескізу (рис. 3.13), територія буде мати ділянку з пляжем та пішохідні доріжки.

а б в

Рисунок 3.13 – Текстури ландшафту: а) камень; б) земля з травою; в) пісок

Тобто, необхідно додати ще шари піску та гравію. Враховуючи ці умови у мережі інтернет були знайдені такі текстури, які є безшовними (при складенні їх поряд не видно переходів між секторами) і задовольняють вказані потреби:

Вбудовані інструменти довільної деформації ландшафту дозволяють розробити такі об’єкти як озеро без втручання інших утиліт (World Editor, тощо.), а вже існуючі матеріали покриття фігури зроблять звичайну площину – водою з невеликими хвилями. За допомогою інструменту «Sculpt» робимо пологий схил, що пізніше стане пляжним берегом, а далі по периметру – різкий спуск, що буде диким берегом. Після чого треба створити геометричну фігуру куб та розтягнути до розмірів озера з вирівнюванням його по висоті таким чином, щоб він імітував водну поверхню. Як його буде налаштовано рівно, тоді накладаємо матеріал води (рис. 3.14).

Рисунок 3.14 – Готова основа озера

Ця основа водоймища буде доповнена рослинністю, характерною для подібних місць, висока трава в дикій частині узбережжя та надводні лілії.

Згідно плану (рис. 3.12) селище повинно мати автомобільні дороги. Тим не менш, для віддаленого від адміністративного центру населеного пункту, як правило, не характерні добре асфальтовані проїжджі частини. Для нашого регіону більш звичні ґрунтові або піщані дороги в таких місцях. Уздовж яких немає тротуарів чи бордюрів, їх замінює проста протоптана доріжка, іноді усипана гравієм.

Процес створення подібних інфраструктурних об’єктів в UE4, схожий на вже описаний алгоритм. Спочатку, за допомогою інструментів формування ландшафту, вручну робимо грязьову, неоднорідну дорогу. У нашому випадку (рис. 3.12), вона проходить через усю карту, маючи при цьому два розгалуження у вигляді троп. Звісно, що як і на минулому етапі, необхідні відповідні текстури, які будуть накладені на заздалегідь підготовлені ділянки ландшафту (рис. 3.15)

а)

б)

Рисунок 3.15 – Текстури доріг: а) ґрунт; б) гравій

Невід’ємною частиною будь-якого ландшафту є рослинність. Без неї пейзаж виглядає порожнім та штучним. За допомогою вбудованого в Unreal Engine 4 інструменту «Foliage» можна зручно розмножити по карті такі об’єкти як: дерева, трава, кущи, тощо. Слід зазначити, якщо виставляти кожне дерево вручну, то це, по перше, займе багато часу, а, по друге, кожна модель буде вважатися за окремий об’єкт, який потребуватиме індивідуального рендеренгу тіней та матеріалів, що значно збільшить навантаження на процесор та відеокарту комп’ютера. Для заповнення мапи було обрано готові моделі дерев «European HornBeam», створені професійними художниками. При розміщені об’єктів враховувалися умови поставленого завдання. Техногенні споруди повинні бути добре помітні. Дерева не мають їх закривати.

Водоймище також потребує оформлення у вигляді лілій та рогозу. За допомогою вищезазначеного інструментарію, було розмножено водні рослини, із набору «MS Aquatic», довкола узбережжя (рис. 3.16).

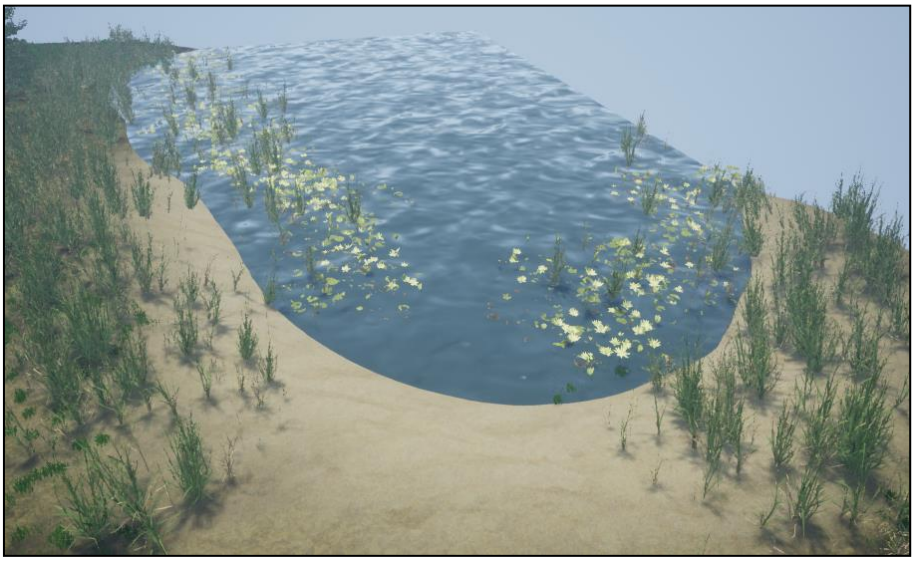


Рисунок 3.16 – Озеро з декораціями

Наступним етапом заповнення карти є розміщення техногенних об’єктів. Для їх моделювання можна застосувати два підходи:

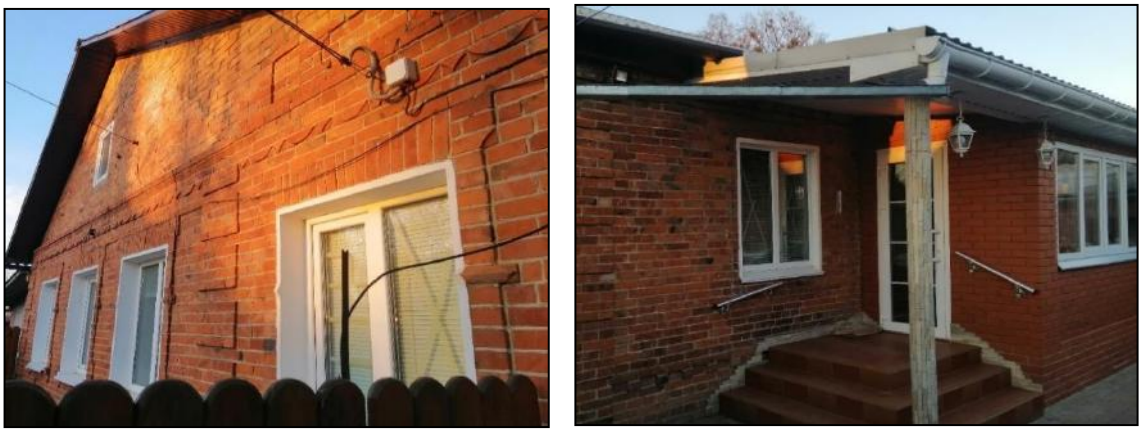
1. Придумати будівлі, наповнення дворів та інше з нуля;
2. Знайти реально існуючі об’єкти та відтворити їх у вигляді 3D-моделей.

Підхід для створення техногенних об’єктів, що будуть розміщені на карті, є змішаним. Деякі будинки мають реальний прототип, а деякі були побудовані на основі власного досвіду та знань про місцевість. Прикладом створення з «фотографії» є приватний будинок у м. Суми на одній з вулиць Роменського мікрорайону (рис. 3.17). Для його переносу в 3Д треба визначити характерні риси цієї споруди:

– Кількість і розташування вікон
– Архітектура побудови
– Матеріал
– Форма даху та його матеріал

З фотографії 3.17а розуміємо, що з фронтальної сторони будинку є близько п’яти пластикових вікон, одне з яких маленького розміру та знаходиться на горищі. Форма будинку квадратна з цегляними стінами, є прибудова у вигляді коридору. Вхідні двері пластикові з великою кількістю скла. Матеріал даху є шиферним, на стику двох половин є металева кришка, яка запобігає краплям дощу затікати під дах. Біля входу є невеличкий ганок з плитки та підпорка для

даху, оформлена каменем. Результатом моделювання є наступний комплексний об’єкт (рис.3.18).



а б

Рисунок 3.17 – Прототип будинку:

а) фото фронтальної сторони будинку; б) фото з боку

Рисунок 3.18 – Будинок, створений за фотографією

На карті (рис. 3.12) можна побачити невеликі квіткові клумби, які знаходяться перед будинками та іншими спорудами. Такі насадження особливо характерні для приватного сектору, або селищ. Огороджені клумби по-різному: від старих покришок до міні паркану. За допомогою вже описаного інструменту «Foliage» квіти розмножені та не перевантажують систему при рендерингу карти. Приклад клумби зображено на рис. 3.19.

Рисунок 3.19 – Квіткова клумба перед будинком

У селищі має бути крамниця, тому на створеній карті вона також є. Має перед собою невелику територію для культурного відпочинку з лавочками та столиками (3.20).

Рисунок 3.20 – Крамниця

На мапі (рис.3.12) вздовж доріг є дерев’яні ліхтарі. Вони були розставлені по карті за допомогою вбудованої функції Spline, яка поділяється на сегменти, між якими є контрольні точки. У ці контрольні точки розміщуються стовпи, а дріт протягується уздовж сегментів (рис. 3.21).

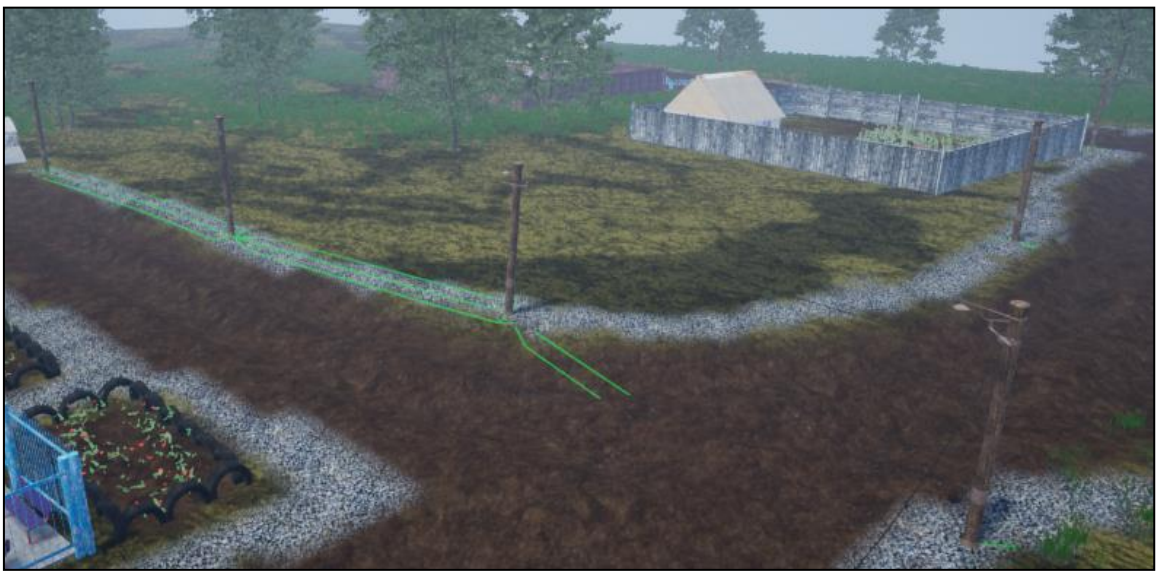


Рисунок 3.21 – Об’єднані дротами стовпи

Останній набір рукотворних об’єктів, який вартий уваги, розташований в глухому куті головної дороги (рис. 3.22).

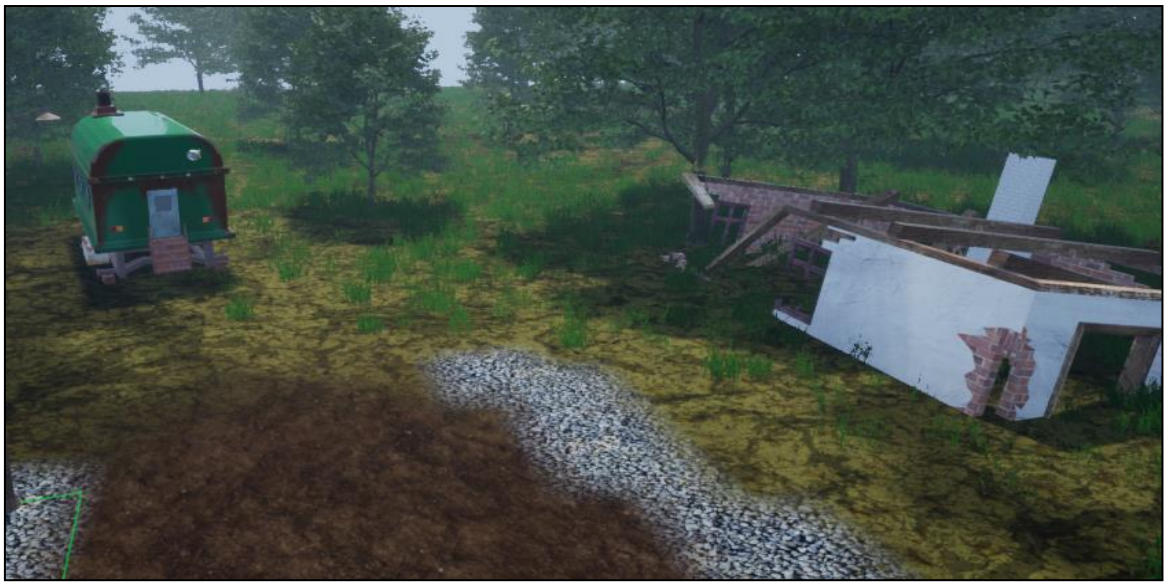


Рисунок 3.22 – Глухий кут та покинуті об’єкти

Для перевірки функціональної ефективності, тестування та формування вхідного математичного опису був використаний багатофункціональний симулятор динамічного оточення. На рисунку 3.23 зображено вид з борту БПЛА, приблизно на висоті 100 метрів.

Рисунок 3.23 – 3D-модель місцевості

На рисунку 3.24 показано кадри ділянок, розміром 52 на 52 пікселів, які були обрані як класи розпізнавання місцевості: клас X_1^0 - техногенні об’єкти; клас X_2^0 – природні об’єкти (рис.3.23).

а б

Рисунок 3.24 – Класи розпізнавання: а – клас X_1^0; б – клас X_2^0;

Варто зазначити, що класи розпізнавання X_1^0 та X_2^0 є не стаціонарними за яскравістю. Це означає, що під час функціонування системи ці об’єкти можуть займати довільне положення в кадрі.

Враховуючи концепцію ІЕІ-технології, яка була обрана як метод дослідження, сформуємо зміст вхідного інформаційного опису БСР [527]:

1) словник ознак розпізнавання;

2) алфавіт класів розпізнавання;

3) вхідна навчальна матриця яскравості $\left\| y_{m,i}^{(j)} \right\|, m = \overline{1,M};\ i = \overline{1,N},\quad j = \overline{1,n}$

4) робоча, бінарна навчальна матриця $\left\| x_{m,i}^{(j)} \right\|$, яка в процесі машинного навчання адаптується до максимальної повної ймовірності прийняття правильних класифікаційних рішень;

5) нормоване поле допусків δ_H на яскравості ознак розпізнавання, яке визначає область значень параметра δ поля контрольних допусків;

6) рівень селекції ρ_m координат усередненого двійкового вектору-реалізації класу розпізнавання X_m^o, який є рівнем квантування реалізацій вхідної навчальної матриці. За замовчуванням приймається $\rho_m = 0.5$.

3.4 Результати комп'ютерного моделювання

Для реалізації інформаційно-екстремального машинного навчання бортової системи розпізнавання, шляхом оброблення кадрів зображення місцевості в декартовій системі координат, була сформована вхідна навчальна матриця. Як критерій оптимізації було обрано модифіковану міру Кульбака в своїй нормованій формі [527]

$$E_{K,m}^{(k)} = \frac{E_m^{(k)}}{E_{\max}^{(k)}}. \tag{3.6}$$

У формулі (3.6) інфоромаційний критерій оптимізації параметрів машинного навчання визначається згідно праці авторів проєкту у вигляді

$$E_m^{(k)} = \frac{\left\lfloor n - (K_{1,m}^{(k)}(d) + K_{2,m}^{(k)}(d)) \right\rfloor}{n} * \log_2 \left\{ \frac{2n + 10^{-r} - \left[K_{1,m}^{(k)}(d) + K_{2,m}^{(k)}(d) \right]}{\left[K_{1,m}^{(k)}(d) + K_{2,m}^{(k)}(d) \right] + 10^{-r}} \right\}, \tag{3.7}$$

де $K_{1,m}^{(k)}(d)$ – кількість подій, які означають неналежність своїх реалізацій класу розпізнавання X_m^o;

$K_{2,m}^{(k)}(d)$ – кількість подій, які означають належність “чужих” реалізацій класу розпізнавання X_m^o;

d – дистанційна міра, яка визначає радіуси гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання, побудованих в радіальному базисі бінарного простору Геммінга;

$E_{K\max}^{(k)}$ – значення інформаційного критерію (3.7) при $K_{1,m}^{(k)}(d) = K_{2,m}^{(k)}(d) = 0$.

На рис. 3.25 показано графік залежності усередненого, за алфавітом класів розпізнавання, нормованого критерію (3.6) від параметра δ поля контрольних допусків, отриманих при їх паралельній оптимізації, коли допуски для всіх ознак змінюються на кожному кроці машинного навчання одночасно. На цьому графіку і далі робочу область визначення функції критерію позначено темним кольором.

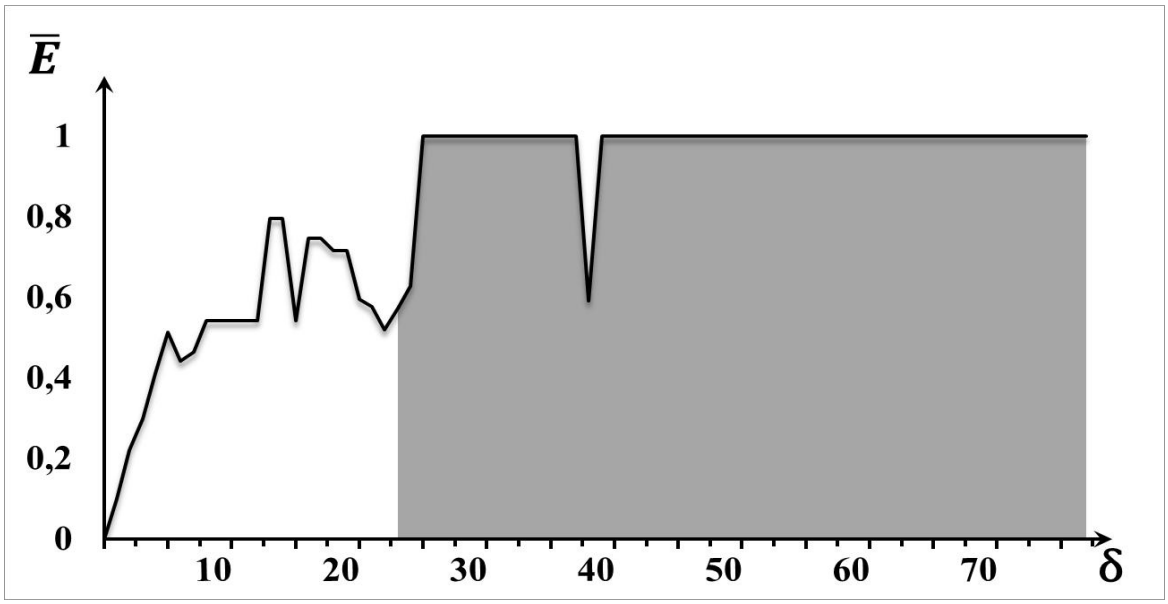


Рисунок 3.25 – Графік залежності інформаційного критерію від параметра поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання [527]

Аналіз рисунку 3.25 показує, що оптимальне значення параметра поля контрольних допусків проблемно визначити візуально, адже критерій набуває

свого максимального значення не в одній точці, а утворює ділянку типу «плато». Згідно з максимально-дистанційним принципом теорії розпізнавання необхідна умова отримання високої достовірності розпізнавання об’єктів полягає в забезпеченні максимальної міжкласової відстані в просторі ознак. У таблиці 3.1 міжкласова відстань для двох класів розпізнавання позначено як

$$d_c = d(x_1 \oplus x_2),$$

де $d(x_1 \oplus x_2)$ – кодова відстань між усередненими векторами ознак класів розпізнавання.

Згідно з мінімально-дистанційним принципом інша необхідна умова отримання високої достовірності розпізнавання об’єктів полягає в забезпеченні мінімальної середньої відстані всіх векторів ознак від центру свого класу розпізнавання. Тобто оптимальні радіуси контейнерів класів розпізнавання повинні бути мінімальними. [527]

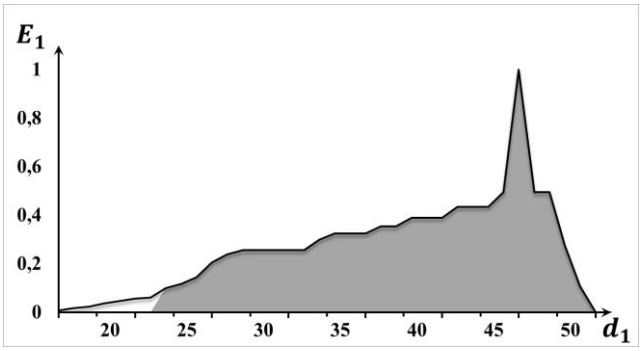
Таблиця 3.2 – Таблиця залежності інформаційного критерію (3.6) від параметрів машинного навчання [527]

δ	$\bar{E}$	D_1	β	d_1	d_c
30	1	1	0	38	45
31	1	1	0	41	48
32	1	1	0	43	50
33	1	1	0	44	51
34	1	1	0	44	51
35	1	1	0	43	51
36	1	1	0	42	51

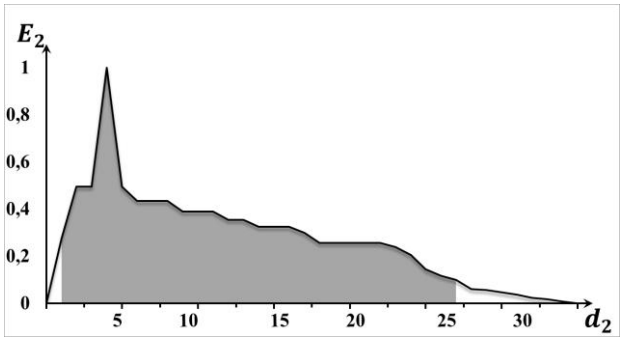
Аналіз табл. 3.2 показує, що згідно з вище наведеними принципами теорії розпізнавання образів оптимальне значення параметра поля контрольних допусків дорівнює $\delta^* = 36$ (в градаціях яскравості) при максимальному значенні інформаційного критерію $\bar{E}^* = 1$. Оскільки досягнуто максимально граничне

значення інформаційного критерію, то немає необхідності у додатковій реалізації послідовного алгоритму оптимізації системи контрольних допусків.

На рис. 3.26 показано графіки залежності інформаційного критерію (3.7) від радіусів контейнерів класів розпізнавання, оптимальні значення яких дозволяють побудувати вирішальні правила.



а



б

Рисунок 3.26 – Графіки залежності критерію (3.18) від радіусів контейнерів класів розпізнавання: а – клас X_1^0; б – клас X_2^0 [527]

Аналіз рисунку 3.26 показує, що оптимальні значення радіусів контейнерів класів розпізнавання дорівнюють: $d_1^* = 46$ (тут і далі в кодових одиницях) – для класу X_1^0; $d_2^* = 4$ – для класу X_2^0;

Перевірка функціональної ефективності машинного навчання бортової системи розпізнавання здійснювалось в режимі екзамену, за результатами якого було отримане оцифроване зображення місцевості (рис. 3.27).

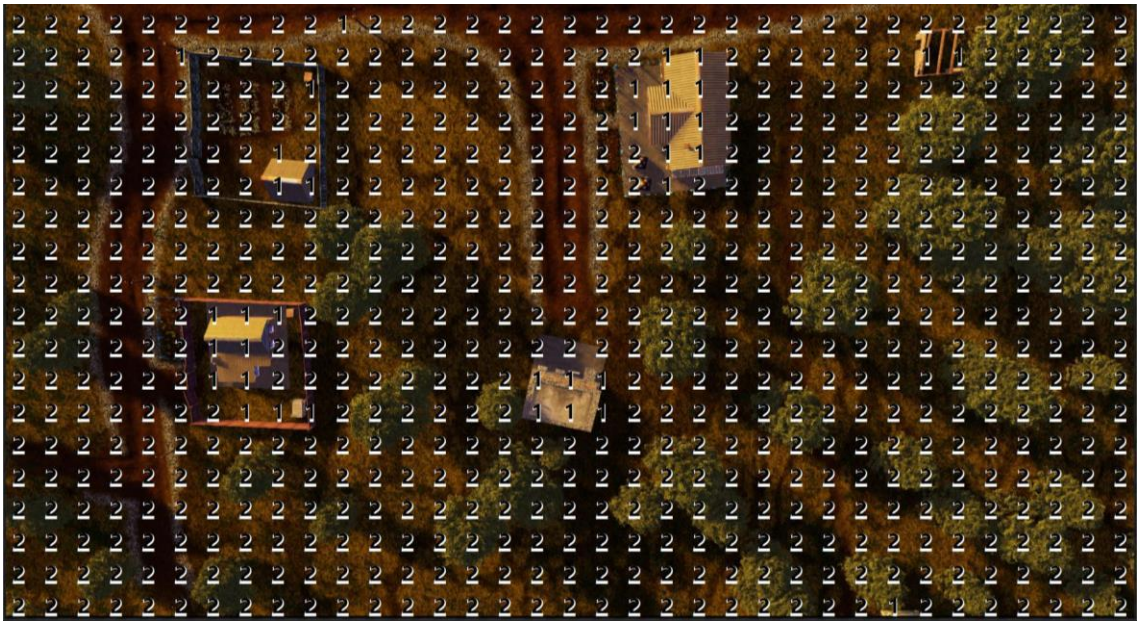


Рисунок 3.27 – Результат класифікації кадрів

Візуальний аналіз рисунку 3.27 показує високу достовірність класифікаційних правил. Тим не менш, не можна стверджувати, що при втручанні зовнішніх факторів на роботу БПЛА об’єкти будуть розпізнаватися так само добре. Проведемо експеримент, де при початкових незмінних умовах (рис. 3.14) додамо ледь помітну димку, яка прикриє собою рецепторне поле безпілотника. Спробуємо ідентифікувати новий інформаційний опис місцевості.

Рисунок 3.28 – Результат класифікації кадрів при зміні початкових умов

Як можна побачити з рисунку 3.28 вирішальні правила помилково ідентифікували димку, як техногенний об'єкт. Це пов'язано, насамперед, з недостатньою чутливістю розробленого класифікатору. Теоретично це можна виправити на етапі паралельної оптимізації системи контрольних допусків (табл.3.1). Замість обрання максимально віддалених між собою класів, можна спробувати навпаки обрати найближчі один до одного. Але це не дасть стовідсоткової впевненості в результаті.

Для забезпечення релевантності класифікатору на етапі екзамену пропонується ввести додатковий квантор перевірки ідентифікації за допомогою апріорно отриманої статистичної інформації. Знаючи, що попередній результат (рис.3.27) є високо достовірним спробуємо вивести деякі закономірності для класів розпізнавання, а саме: усереднене значення яскравості

$$\mu_m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N}\theta_i\,, \qquad (3.8)$$

де θ_i – значення яскравості RGB-складової в *i*-му пікселі рецепторного поля зображення кадру; *N* – кількість ознак;

та вибіркову дисперсію яскравості навчальної матриці

$$S_m = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\theta_{i,m} - \bar{\theta})^2 \qquad (3.9)$$

де S_m – значення дисперсії для класу m, $m = \overline{1, M}$; *N* – кількість ознак;

θ_i – усереднене значення яскравості пікселів, що входять до *i*-ї ознаки;

$\bar{\theta}$ – усереднене значення яскравості кадру;

Статистичний аналіз показує, що на рисунку 3.27 до класу розпізнавання X_1^0 відносяться 37 кадрів, до класу розпізнавання X_2^0 - 663. Після виконання обчислень маємо наступні значення середньої яскравості та дисперсії цих двох груп: $\theta_1 = 73{,}82$, $\theta_2 = 33.16$; $S_1 = 1516.20$, $S_2 = 290.19$;

Розрахуємо середньоквадратичне відхилення для показників усередненої яскравості кожного з кадрів відповідних класів за формулою

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{L}(\theta_{m,i} - \mu_m)^2}{L}} \tag{3.10}$$

де σ_m – середньо квадратичне відхилення для класу m, $m = \overline{1, M}$; L – загальна кількість ідентифікованих кадрів; $\theta_{m,i}$ – усереднене значення яскравості і-го кадру; μ_m - це усереднене значення яскравості для усіх кадрів відповідного класу.

У нашому випадку середньоквадратичне відхилення для обох класівдорівнює: $\sigma_0 = 15.83$, $\sigma_1 = 15.60$. За допомогою цієї статистичної інформації перевіримо релевантність ідентифікації для рис. 3.28. Оскільки яскравість будь-якого кадру, який класифікується якклас розпізнавання X_1^0, не повинна бути менша ніж$\mu_0 - \sigma_0$ і не більша від $\mu_0 + \sigma_0$. Тобто має знаходитися в проміжку між 57.9 та 89.65 відповідних значень яскравості. Усе, що не відповідає цьому вторинному критерію, вважаємо за помилкову класифікацію. На рисунку 3.29 зображено оновлений результат ідентифікації при використані додаткового квантору перевірки вирішальних правил на етапі екзамену.

Рисунок 3.29 – Результат класифікації кадрів при додаванні додаткового квантору перевірки

Як бачимо з рисунку 3.29 система у більшості випадках змогла вірно ідентифікувати димку, як шум. Наступним кроком дослідження є створення більш точних додаткових кванторів перевірки або перенавчання системи з розширенням алфавіту класів розпізнавання. Тим не менш, отриманий результат не був би можливий без попередніх досліджень авторів [12 – 14], де досліджується подібність деяких статистичних характеристик кадрів, що відносяться до одного спільного класу розпізнавання.

3.5 Висновок

Для формування вхідного інформаційного опису, а також тестуванні розробленої бортової системи, був використаний багатофункціональний симулятор динамічного оточення, який дозволив реалізувати імітацію умов функціонування безпілотника, наближених до реальних.

Перевірка функціональної ефективності вирішальних правил була виконана під час етапу екзамену, де вдалося отримати достовірний результат класифікації кадрів зображення.

ВИСНОВКИ

1. Досліджено можливість тонкого розточування ступінчастих отворів з великою різницею діаметрів кроків унікальними розточувальними стрижнями, що забезпечують однакову рекомендовану швидкість різання. За рахунок такого розточування знос різців практично однаковий, що призводить до підвищення точності розточування, стабільності значень шорсткості і відхилень від округлості, а також розточування за одну наладку, що дозволяє скоротити час на налагодження різців.

2. Розроблено динамічну модель, яка описує зв'язані згинально-крутильні коливання для розрахунку амплітуд коливань розточувальної штанги. Для розв'язування системи рівнянь розроблено програму для ПК та розраховано вібростійкість замкнутої динамічної системи за критерієм Рауса–Гурвіца. Результати експериментальних досліджень і чисельних розрахунків свідчать про те, що розвиток рівнів інтенсивних коливань не залежить від збігу власних частот згинальних і крутильних форм і їх кратності. Вплив крутильних коливань на згинальні проявляється для розточувальних прутків діаметром менше 12 мм. Використовуючи критерій граничної відповідності, можна спрогнозувати вібростійкість під час різання розточувальних штанг з діаметрами більше 12 мм без урахування зв'язку між згинальними і крутильними коливаннями. Ефективне зниження рівня коливань (у 2–3 рази) при бурінні глибоких отворів з $l/d > 3$ досягалося шляхом накладення на згинальні коливань додаткових збурень із наперед заданими параметрами.

3. Запропоновано математичну модель розрахунку механічної системи «верстатний пристрій – заготовка», яка дозволяє визначати точки контакту функціональних елементів, мінімально необхідне зусилля затиску, складові сил різання та місця їх прикладання. Запропоновано регресійні залежності для оцінювання жорсткості функціональних елементів верстатних пристроїв.

4. Розроблено математичну модель динамічного аналізу, яка описується системою диференціальних рівнянь 12 порядку у матричній формі відносно 6 змінних за незалежними від часу параметрами. Представлена модель дозволяє

досліджувати власні частоти механічної системи «верстатний пристрій – заготовка» та визначає відповідні форми вільних коливань. Модель також дозволяє досліджувати вимушені коливання заготовки відносно рівноважного положення внаслідок дії динамічних складових сил і моментів різання, а також визначає амплітудну частотну характеристику (АЧХ), у т. ч. резонансну частоту.

5. Теоретично доведено гіпотезу щодо можливості досягнення точнісних параметрів механічного оброблення у виробничому процесі із неповним базуванням на прикладі розробленої конструкції гнучкого виробничого процесу для установлення нерознімних шатунів для умов багатономенклатурного виробництва.

6. Теоретично встановлено, що закріплення нерознімних шатунів при частковому базуванні забезпечує отримання необхідних показників точності оброблення згідно з кресленням.

7. Запропоновано новий підхід до проєктування структури складальних операцій на прикладі процесу складання виробів шатунно-поршневої групи на роботизованій ділянці, що дозволило раціонально перерозподілити технологічні переходи між оператором і роботами, зокрема: 1) обґрунтовано доцільність впровадження комірок колаборативного складання для підвищення ефективності процесу складання в умовах багатономенклатурного виробництва; 2) запропоновано конструктивне рішення щодо складання виробів шатунно-поршневої групи, що на 34% покращує процес складання в умовах багатономенклатурного виробництва порівняно з ручним складанням; 3) запропоновано та розроблено нову конструкцію захоплювального пристрою для колаборативного робота, яка скорочує витрати часу на підготовку виробництва, підвищує ступінь гнучкості та компенсує похибки, пов’язані з технологічним процесом одержання заготовок.

8. Розроблено комплексну автоматизовану методику вибору матеріалів, яка базується на комплексному застосуванні регресійного аналізу і ймовірнісного підходу. Зокрема, запропоновано матричні залежності для розв’язання прямих і обернених задач раціонального вибору матеріалу за його фізико-механічними властивостями.

9. Запропоновано спосіб підвищення надійності твердосплавного різального інструменту на основі оброблення інструментального твердого сплаву імпульсами магнітного поля за рахунок стабілізації його фізико-механічних властивостей (зменшення коефіцієнта варіації мікротвердості з 0,13 до 0,06 і стабільності – з 0,48 до 0,27).

10. Запропоновано спосіб отримання зміцненого поверхневого шару легованих сталей на основі застосування методу азотування в контейнері з використанням нанокристалічного порошку. Отримання глибини азотованого шару до 0,3–0,5 мм (залежно від складу сталі) зі збільшенням поверхневої мікротвердості до 12,7 ГПа дозволяє прискорити оброблення в 10 разів у порівнянні з традиційним газовим азотуванням. Таке співвідношення твердості поверхневого шару та її розподілу по глибині сталі підвищує зносостійкість різального інструмента у 1,2–1,8 раза залежно від легкості.

11. Встановлена можливість титаноалітування інструментальної сталі У8А з попередньо нанесеними покриттями методами хіміко-термічної обробки: дифузійно-хромованої з карбідними шарами Cr7C3, Cr23C6; азотованої, а також методами фізичного осадження з газової фази шару TiN. Отримані покриття окладаються з карбідів хрома Cr7C3, Cr23C6, карбіда титана TiC, нітрида титана TiN та інтерметалідів за участю Ti, Al, Cr, Fe. Шари карбідів хрома, нітрида титана TiN виконують роль бар’єрів, які перешкоджають проникнення алюмінію в сталеву основу і гальмують утворення під даною сполукою шару Feα(Al).

12. Створено уточнену математичну модель динаміки ротора з використанням скінченних балкових елементів. У моделі розглядається залежність жорсткості радіальних опор ротора від частоти його обертання. Достовірність математичної моделі підтверджується допустимими відмінностями отриманих результатів у межах 3 %, а також дотриманням теореми про взаємне розташування спектрів власних і критичних частот.

13. На основі критеріїв Рауса–Гурвіца оцінено динамічну стійкість руху ротора модернізовано відцентровий насос ЦНА 600-35 для водопостачання промислового контуру атомних електростанцій для різних значень робочої частоти та коефіцієнта демпфування, а також побудовано відповідну область

стійкості. Встановлено, що запас динамічної стійкості спроєктованого ротора становить 764 %.

14. Здійснено параметричну ідентифікацію дискретномасової моделі ротора, що дозволило запропонувати критерії для оцінювання точності динамічної моделі. Отриману модель розширено на випадок вимушених коливань шляхом додавання сил інерції залишкових дисбалансів, нелінійного демпфування та гідродинамічної жорсткості, нелінійних сил тертя та циркуляційної сили в шпаринних ущільненнях, а також сил можливої контактної взаємодії між ротором і статором на нерозрахункових режимах.

15. Реалізовано новий підхід щодо ідентифікації кадрів у рамках розробленої технології машинного навчання бортової системи БПЛА. Введення додаткового статистичного квантора перевірки класифікації дозволяє підвищити релевантність вирішальних правил при прийнятті рішень автономною бортовою системою БПЛА з метою зменшення впливу зовнішнього шуму на результати ідентифікації зображень.

16. Встановлено, що використання моделей САПР з розширеними функціями дуже корисно в різних галузях навчального процесу або навчання нових співробітників, навіть у їх «статичному» вигляді. Інтегруючи різні інші функції в спеціалізоване програмне забезпечення, можна створювати повністю інтерактивні послідовності в AR. Використання цього програмного забезпечення та визначення окремих кроків є інтуїтивно зрозумілими завдяки їхній спеціалізації, тому їх використання є задовільним навіть у тих сферах, де технологія AR не є основною.

17. Розроблена концепція системи контролю якості 3D-друк, яка розділена на послідовні в часі три частини: підготовчі етапи, етап виготовлення та етап після виробництва. На етапі виготовлення необхідно приділити особливу увагу до діагностики друку 1-го шару, оскільки він визначає експлуатаційні характеристики об'єкта друку. Для цього перспективним напрямком є використання відповідного програмно-технічного забезпечення, що містить камеру, лазерний датчик переміщення та LabVIEW.

18. Запропоновано альтернативні схемні рішення на базі рідинно-парового ежектора та рідинно-парового ежектора і рідинно-кільцевого вакуумного насоса. За результатами термоекономічного аналізу визначено загальну вартість палива та питому вартість одиниці продукту у нових та традиційній схемі конденсаційної установки. Застосування РПЕ дає змогу зменшити загальну вартість палива в середньому на 704,28 у. о. на рік. Також можливо зменшити питому вартість одиниці продукту в середньому на 51 % без урахування витрат на генерацію котельної пари у традиційних схемах. Застосування схеми РПЕ+РКВН збільшує питому вартість одиниці продукту на 2%, що є наслідком додаткових витрат на привод допоміжного обладнання (насосів, вентилятора градирні тощо).

Отримані вході виконання науково-дослідної роботи результати були частиною випускних кваліфікаційних робіт студентів факультету «Технічних систем та енергоефективних технологій» та факультету «Електроніки та інформаційних технологій» Сумського державного університету, зокрема: М. М. Амелін; В. В. Сивоконь; М. К. Супруненко В. А. Хоменко; Осипенко Д.В.; Парфенцев І. С.; А. Дударь та М. Ілюхін. Науковими керівниками зазначених кваліфікаційних робіт були науково-педагогічні працівники виконавці відповідної науково-дослідної роботи.

Частина результатів науково-дослідної роботи було оприлюднено в наступних наукових публікаціях: [1, 36, 82, 423, 427, 521, 527, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556].

РЕКОМЕНДАЦІЇ

Зростання концентрації лігатури Ti-Zr веде до збільшення твердості силуміну АК5М2 як в литому, так і термообробленому стані.

Подальші дослідження підходу до проектування виробничих процесів, що заснований на наданні надійного закріплення заготовки та застосуванні сучасних верстатів із функціями автоматичного визначення координат оброблюваної заготовки повинні бути спрямовані на експериментальне підтвердження результатів чисельного моделювання та включати визначення величин переміщень під дією статичного навантаження та амплітуд коливань у процесі механічного оброблення. При цьому як і в теоретичних дослідженнях повинно бути враховано динамічні складові сили і моментів різання.

Комплексна автоматизована методика відбору матеріалів може оцінювати довільний матеріал із його загальної групи за виміряними фізико-механічними властивостями. Це дозволяє реалізовувати автоматизований вибір матеріалу з використанням єдиного підходу для проектування елементів машин у машинобудуванні, інтелектуальному виробництві та промисловому проектуванні.

Майбутній напрямок діяльності SmartTechLab треба зосередити на завершенні створення цифрової моделі-близнюка робочого місця, передачі даних від фактичної складальної дільниці до цієї моделі та проектуванні та реалізації системи моніторингу 3D-друку в реальному часі.

Застосування параметричної ідентифікації дискретних мас для переходу від скінченно-елементної моделі вільних коливань колінчастого валу до дискретно-масової дозволить розробляти поршневі компресорні установки високого тиску та двигуни внутрішнього згоряння в автомобільній, авіакосмічній, сільськогосподарській, морській та військовій промисловості з більш стабільними динамічними характеристиками.

Для підвищення функціональної ефективності машинного навчання бортової системи розпізнавання необхідно збільшити його глибину шляхом

оптимізації додаткових параметрів машинного навчання, включаючи параметри формування вхідної навчальної матриці.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1 Залога В.О. Методологічні основи підвищення ефективності оброблення деталей шляхом керування динамікою процесу високошвидкісного точіння з високими частотами обертання шпинделя : монографія / В.О. Залога, Ю.В. Шаповал. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 135 с.

2 Шаповал Ю. В. Підвищення ефективності оброблення деталей на токарних верстатах шляхом керування динамікою процесу з високими частотами обертання шпинделя. автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.03.01 / Шаповал Юрій Володимирович ; Житомирський державний технологічний університет. – Житомир, 2018. – 24 с. https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/7320/Shapoval.pdf?sequence=3&isAllowed=y

3 Varshney, D., Kumar, K.: Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization. Ain Shams Engineering Journal 12(1), 1143–1152 (2021). https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.013

4 Grimzin, I., Ponomarenko, O., Marynenko, D., Yevtushenko, N., Berlizeva, T.: The Technological Process of Obtaining Sand-Plaster Molds for Complex Thin-Walled Aluminum Castings. In: Tonkonogyi, V., et al. (eds.) InterPartner 2019. LNME, pp. 405–414. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_41

5 Vlasiy, O., Mazurenko, V., Ropyak, L., Rogal, O.: Improving the aluminum drill pipes stability by optimizing the shape of protector thickening. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 1(7–85), 25–31 (2017). https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.65718

6 Joost, W.J.: Reducing vehicle weight and improving U.S. energy efficiency using integrated computational materials engineering. JOM 64, 1032–1038 (2012). https://doi.org/10.1007/s11837-012-0424-z

7 Mavhungu, S.T., Akinlabi, E.T., Onitiri, M.A., Varachia, F.M.: Aluminum matrix composites for industrial use: advances and trends. Procedia Manufacturing 7, 178–182 (2017). https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.045

8 Pavlenko, I., Liaposhchenko, A., Ochowiak, M., Demyanenko, M.: Solving the stationary hydroaeroelasticity problem for dynamic deflection elements of separation devices. Vibrations in Physical Systems 29, 2018026 (2018)

9 Andrenko, P., Rogovyi, A., Hrechka, I., Khovanskyi, S., Svynarenko, M.: The Influence of the Gas Content in the Working Fluid on Parameters of the the Hydraulic Motor's Axial Piston. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds.) DSMIE 2021.LNME, pp. 97–106. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_10

10 Panchenko, A., et al.: Development of the universal model of mechatronic system with a hydraulic drive. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 4(7–94), 51–60 (2018). https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139577

11 Ivanov, V., Pavlenko, I., Kuric, I., Kosov, M.: Mathematical Modeling and Numerical Simulation of Fixtures for Fork-Type Parts Manufacturing. In: Knapˇcíková, L., Balog, M. (eds.) Industry 4.0: Trends in Management of Intelligent Manufacturing Systems. EICC, pp. 133–142. Springer, Cham (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-030-14011-3_12

12 Ponomarenko, O., Grimzin, I., Yevtushenko, N., Lysenko, T., Marynenko, D.: Advanced Technologies of Manufacturing Readily Removable Cores for Obtaining High-Quality Castings. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Perakovi ́c, D. (eds.) DSMIE 2021. LNME, pp. 565–574. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_56

13 Capuzzi, S., Timelli, G.: Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: a review. Metals 8, 249 (2018). https://doi.org/10.3390/met8040249

14 Imbirovych, N., Povstyanoy, O., Zaleta, O., Shymchuk, S., Priadko, O.: The Influence of Synthesis Modes on Operational Properties of Oxide Ceramic Coatings on Aluminum Alloys. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J.,

Perakovi ́c, D. (eds.) DSMIE 2021. LNME, pp. 536–545. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_53

15 Loskutova, T., et al.: Composition, Structure, and Properties of Ti, Al, Cr, N, C Multilayer coatings on AISI W1–7 alloyed tool steel. Coatings 12, 616 (2022). https://doi.org/10.3390/coatings12050616

16 Santhosh, M.S., Sasikumar, R.: Influences of aluminium / E-glass volume fraction on flexural and impact behaviour of GLARE hybrid composites. J. Eng. Sci. 6(1), C6–C10 (2019). https://doi.org/10.21272/jes.2019.6(1).c2

17 Zabolotnyi, O., Pasternak, V., Ilchuk, N., Huliieva, N., Cagáˇnová, D.: Powder Technology and Software Tools for Microstructure Control of AlCu2 Samples. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Perakovi ́c, D. (eds.) DSMIE 2021. LNME, pp. 585–593. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_58

18 Demchenko,M.V., Gaponova, O.P.,Myslyvchenko, O.M., Antoszewski, B., Bychenko,M.M.: Microstructure and properties of AlCrFeCoNiCux high-entropy alloys. J. Eng. Sci. 5(1), C11–C15 (2018). https://doi.org/10.21272/jes.2018.5(1).c3

19 Udovytska, Y.A., et al.: Effect of epoxy composite coatings on radiation stability and magnetic sensitivity of n-Si single crystals. Surf. Engin. Appl. Electrochem. 57, 222–227 (2021). https://doi.org/10.3103/S1068375521020125

20 Budnik, A.F., Rudenko, P.V., Berladir, KV., Budnik, O.A.: Structured nanoobjects of polytetrafluoroethylene composites. J. Nano- Electron. Phys. 7(2), 02022 (2015)

21 Peter, I., Varga, B.: Some considerations on the structure refinement in al-based alloys. In: Sivasankaran, S. (ed.) Aluminium Alloys - Recent Trends in Processing, Characterization, Mechanical Behavior and Applications. IntechOpen, London (2017). https://doi.org/10.5772/intechopen.71450

22 Shlyaptseva, A.D., Petrov, I.A., Ryakhovsky, A.P., Medvedeva, E.V., Tcherdyntsev, V.V.: Complex structure modification and improvement of properties of aluminium casting alloys with various silicon content. Metals 11, 1946 (2021).

https://doi.org/10.3390/met1112194621. Savchenkov, S., Kosov, Y., Bazhin, V., Krylov, K., Kawalla, R.: Microstructural master alloys features of aluminum-erbium system. Curr. Comput.-Aided Drug Des. 11, 1353 (2021). https://doi.org/10.3390/cryst11111353

23 Kostyk, K., et al.: Simulation of diffusion processes in chemical and thermal processing of machine parts. Processes 9(4), 698 (2021). https://doi.org/10.3390/pr9040698

24 Kusyi, Y., Onysko, O., Kuk, A., Solohub, B., Kopei, V.: Development of the technique for designing rational routes of the functional surfaces processing of products. In: Karabegovi ́c, I., Kova ˇcevi ́c, A., Mandžuka, S. (eds.) New Technologies, Development and Application V. NT 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 472, pp. 135–143. Springer, Cham (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-031-05230-9_16

25 Zablotskyi, V., Moroz, S., Tkachuk, A., Prystupa, S., Zabolotnyi, O.: Influence of Diamond Smoothering Treatment Power Parameters on Microgeometry of Working Surfaces of Conjugated Parts. In: Tonkonogyi, V., et al. (eds.) InterPartner 2019. LNME, pp. 372–381. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_38

26 Zablotskyi, V., Moroz, S., Tkachuk, A., Prystupa, S., Zabolotnyi, O.: Influence of Diamond Smoothering Treatment Power Parameters on Microgeometry of Working Surfaces of Conjugated Parts. In: Tonkonogyi, V., et al. (eds.) InterPartner 2019. LNME, pp. 372–381. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_38

27 Bychkov, A.S., Kondratiev, A.V.: Criterion-based assessment of performance improvement for aircraft structural parts with thermal spray coatings. J. Superhard Mater. 41(1), 53–59 (2019). https://doi.org/10.3103/S1063457619010088

28 Kuz’min, M.P., et al.: Obtaining of Al–Si foundry alloys using amorphous microsilica –crystalline silicon production waste. Journal of Alloys and Compounds 806, 806−813 (2019). https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.312

29 Gilev, I.O., Kotenkov, P.V., Popova, E.A., Shubin, A.B.: Effect of Ti and Zr additions on the structure and mechanical properties of the Al–4 % Cu alloy. In: AIP Conference Proceedings 2466, 060006 (2022). https://doi.org/10.1063/5.0088878

30 Cherepanov, A.I., et al.: The effect of fast crystallization ligature modification on the microstructure of aluminum alloys J. Phys.: Conf. Ser. 1515, 052043 (2020). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/5/052043

31 Romanchenko, O., Lohunov, O., Kharlamov, Y., Sokolov, V., Krol, O.: Microindentation Hardness Testing of D – gun Sprayed Coatings. In: Cioboat ̆a, D.D. (ed.) ICoRSE 2021. LNNS, vol. 305, pp. 91–99. Springer, Cham (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-030-83368-8_9

32 Mamzurina, O.I., et al.: Effect of Zr on microstructure and mechanical properties of the Al–Cu–Yb and Al–Cu–Gd Alloys. Metals 12, 479 (2022). https://doi.org/10.3390/met12030479

33 Berladir, K., Hovorun, T., Gusak, O., Reshetniak, Y., Khudaybergenov, D.: Influence of Modifiers-Ligatures on the Properties of Cast Aluminum Alloy AK5M2 for the Automotive Industry. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Perakovi ́c, D. (eds.) DSMIE 2020. LNME, pp. 473–482. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_46

34 Denysenko, Y., Dynnyk, O., Yashyna, T., et al.: Implementation of CALS-Technologies in Quality Management of Product Life Cycle Processes. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 3□12 (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_1

35 Karabegovic, I., Karabegovic, E., Mahmic, M., et al.: The Role of Smart Sensors in Production Processes and the Implementation of Industry 4.0. J. Eng. Sci 6(2), B8–B13 (2019). https://doi.org/10.21272/jes.2019.6(2).b2

36 Парфенцев, І.С. Проектування технологічного процесу виготовлення вала ведучого Н17.211.05.01 [Текст]: робота на здобуття кваліфікаційного рівня

бакалавра; спец.: 131 - прикладна механіка (технології машинобудування) / І.С. Парфенцев; наук. кер. П.В. Кушніров. - Суми: СумДУ, 2021. - 59 с.

37 Akimov, O., Marchenko, A., Alyokhin, V., et al.: Computer engineering and design of cast parts for internal combustion engine crankcase. J. Eng. Sci 6(2), E24–E30 (2019), https://doi.org/10.21272/jes.2019.6(2).e4

38 Osadchiy, I., Kryvoruchko, D., Kolesnyk, V., et al.: Development of Integrated Technology of FRP Gear Manufacturing. Manufact. Technol. 16(3), pp. 574–578 (2016). https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/3/574

39 Gleeson, F., Coughlan, P., Goodman, L., et al.: Improving manufacturing productivity by combining cognitive engineering and lean-six sigma methods. Procedia CIRP 81, pp. 641–646 (2019). https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.169

40 Kondakov, A.: Productivity as Measure of Multiproduct Metal Processing Production Efficiency. Procedia Eng. 150, pp. 987–991 (2016). https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.151

41 Shanmugasundar, G., Dharanidharan, M., Vishwa, D., et al.: Design, analysis and topology optimization of connecting rod. Mater. Today: Proceed. 46(9), pp. 3430–3438 (2021). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.778

42 Xiao, J., Qin, W., Xu, S.: Interference and thickness design of bushing of connecting rod small end for Anti-loosening. Eng. Failure Analysis 127, 105556 (2021). https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105556

43 Xiao, J., Qin, W., Xu, S.: Interference and thickness design of bushing of connecting rod small end for Anti-loosening. Eng. Failure Analysis 127, 105556 (2021). https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105556

44 Basavaraj, Y., Joshi, R., Setty, R., et al.: FEA of NX-11 unigraphics modeled connecting rod using different materials. Mater. Today: Proceed. 46(7), pp. 2807–2813 (2021). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.620

45 Seyedzavvar, M., Seyedzavvar, M.: Design of high duty diesel engine connecting rod based on finite element analysis. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 40, 59 (2018). https://doi.org/10.1007/s40430-018-0988-9

46 Strozzi, A., Baldini, A., Giacopini, M., et al.: A repertoire of failures in connecting rods for internal combustion engines, and indications on traditional and advanced design methods. Eng. Failure Analysis 60, pp. 20–39 (2016). https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.034

47 Chao, J.: Fretting-fatigue induced failure of a connecting rod. Eng. Failure Analysis 96, pp. 186–201 (2019). https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.10.006

48 Jia, D., Li, Y., Deng, et al.: Design research on forging mark of connecting rod. Eng. Failure Analysis 113, 104537 (2020). https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104537

49 Balamurugan, R., Kirubagharan, R., Ramesh, C.: Implementation of lean tools and techniques in a connecting rod manufacturing industry. Mater. Today: Proceed. 33(7), pp. 3108–3113 (2020). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.702

50 Liu, X., Liu, J., Zhou, H., et al.: Chapter 12 – Digital twin driven process design evaluation. In: Tao F. et al. (eds) Digital Twin Driven Smart Design, Academic Press, pp. 309–332 (2020). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818918-4.00012-9

51 Machining Fixture for Connecting Rod. https://www.indiamart.com/proddetail/machining-fixture-for-connecting-rod-14363410788.html

52 USA-Made Racer Elite Connecting Rods Deliver Factory-Level Performance. http://blog.wiseco.com/usa-made-racer-elite-connecting-rods-deliver-factory-level-performance

53 Kar, A.: Connecting Rod Manufacturing. Report number: MAE2018TAP. Affiliation: Czech Technical University in Prague, P. 29 (2019). https://www.researchgate.net/publication/330183972_Connecting_Rod_Manufacturing

54 Raijada, S., Dudhatra, A.: Design of fixture of connecting rod for boring operation. International Journal For Scientific Research And Development 2(9), pp. 538–540 (2014). http://ijsrd.com/Article.php?manuscript=IJSRDV2I9266

55 Malave, S., Chitari, A., Patil, A., et al.: Design and Manufacturing of Hydraulic Fixture for Connecting Rod Bush Boring. International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering, June 2017 5(6), pp. 1530–1536 (2017). https://ijritcc.org/download/conferences/ICIIIME_2017/ICIIIME_2017_Track/1498548299_27-06-2017.pdf

56 Koç, M. and Özel, T.: Modern Manufacturing Processes. Wiley. 520 p. (2020)

57 Gupta H.N., Gupta R.C., Mittal A. Manufacturing Processes (2nd Edition). New Age International (P) Ltd., Publishers, 179 p. (2009)

58 Ivanov, V., Dehtiarov, I., Evtuhov, A., et al.: Multiaxis Machining of Fork-Type Parts: Fixture Design and Numerical Simulation. In: Karabegović I. (eds) New Technologies, Development and Application IV. NT 2021. Lecture Notes in Networks and Systems 233, pp. 142–152 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-75275-0_17

59 Ivanov, V., Dehtiarov, I., Zaloga, V., Kosov, I., Savchuk, V. Increasing Productivity of Connecting Rods Machining. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 264-275 (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_26

60 Ivanov, V.: Process-oriented approach to fixture design. In: Ivanov, V., et al. (eds.) DSMIE 2018. LNME, pp. 42–50. Springer, Cham (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_5

61 Odilov, E., Mardonov, U., Abdirakhmonov, K., Eshkulov, A., Rakhmatov, B.: Effect of magnetic field on the physical and chemical properties of flowing lubricating cooling liquids used in the manufacturing process. IIUM Eng. J. 22(2), 327–338 (2021). https://doi.org/10.31436/iiumej.v22i2.1768

62 Krehel, R., Szentivanyi, P., Kocisko, M., Pollak, M.: Technical and economic description of the research on a measuring device for continuous measurement of the diameter and vibration of the workpiece during the machining process. Adv. Mater. Sci. Eng. 1(2), 3373197 (2021). https://doi.org/10.1155/2021/3373197

63 Bovas Herbert Bejaxhin, A., Balamurugan, G., Sivagami, S., Ramkumar, K., Vijayan, V., Rajkumar, S.: Tribological behavior and analysis on surface roughness of CNC milled dual heat treated Al6061 composites. Adv. Mater. Sci. Eng. 1(2), 3844194 (2021). https://doi.org/10.1155/2021/3844194

64 Lowe, A., Majumdar, K., Mavrokoridis, K., Philippou, B., Roberts, A., Touramanis, C.: A novel manufacturing process for glass THGEMs and first characterisation in an optical gaseous argon TPC. Appl. Sci. 11, 9450 (2021). https://doi.org/10.3390/app11209450

65 Lam Khanh, N., Van Cuong, N.: Parameter selection to ensure multi-criteria optimization of the taguchi method combined with the data envelopment analysis-based ranking method when milling SCM440 steel. Eng. Technol. Appl. Sci. Res. 11(5), 7551–7557 (2021). https://doi.org/10.48084/etasr.4315

66 Pasternak, V., Zabolotnyi, O., Ilchuk, N., Cagáňová, D., Hulchuk, Y.: Improvement of processes for obtaining titanium alloys for manufacturing parts with design elements. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds.) InterPartner 2021. LNME, pp. 323–333. Springer, Cham (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_32

67 Hage, T., Fritzsche, M, Henkel, S., Bliedtner, J.: High-resolution measurement technology for the detection of complex process influences in machining operations. In: Proceedings of the EPJ Web of Conferences, vol. 255, p. 03003 (2021).https://doi.org/10.1051/epjconf/202125503003

68 Li, N., Feng, C.: Research on machining workshop batch scheduling incorporating the completion time and non-processing energy consumption considering product structure. Energies 14, 6079 (2021). https://doi.org/10.3390/en14196079

69 Abarkan, I., Khamlichi, A, Shamass, R.: Numerical modeling of the low cycle fatigue: effect of manufacturing imperfections caused by machining process. In: Proceedings of the MATEC Web of Conference, vol. 349, p. 02011 (2021). https://doi.org/10.1051/matecconf/202134902011

70 Ikonnikov, A., Leonov, S.: Theoretical-probability model for calculating roofness in magnetic abrasive machining. In: Proceedings of the MATEC Web of Conferences, vol. 346, p. 01045 (2021).https://doi.org/10.1051/matecconf/202134601045

71 Zabolotnyi, O., Pasternak, V., Ilchuk, N., Huliieva, N., Cagáňová, D.: Powder technology and software tools for microstructure control of AlCu2 samples. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds.) DSMIE 2021. LNME, pp. 585–593. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_58

72 Berladir, K.V., Hovorun, T.P., Bilous, O.A., Baranova, S.V.: The modeling of the composition and properties of functional materials based on polytetrafluoroethylene. Funct. Mater. 25(2), 342–347 (2018). https://doi.org/10.15407/fm25.02.342

73 Berladir, K.V., Hovorun, T.P., Sviderskiy, V.A., Rudenko, P.V., Vyshehorodtseva, M.E.: Nanostructural modification of polytetrafluoroethylene and its composition by energy influence. J. Nano-Electron. Phys. 8(1), 01033-1-01033–5 (2016). https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01033

74 Abu-Mahfouz, I., Banerjee, A., Rahman, E.: Evolutionary optimization of machining parameters based on surface roughness in end milling of hot rolled steel. Materials 14(19), 5494 (2021). https://doi.org/10.3390/ma14195494

75 Karpus, V.E., Ivanov, V.A.: Choice of the optimal configuration of modular reusable fixtures. Russ. Engin. Res. 32, 213–219 (2012). https://doi.org/10.3103/S1068798X12030124

76 Elgnemi, T., Songmene, V., Kouam, J., Jun, M., Samuel, A.: Experimental investigation on dry routing of CFRP composite: Temperature, forces, tool wear, and fine dust emission. Materials 14(19), 5697 (2021). https://doi.org/10.3390/ma14195697

77 Shvets, S.V., Machado, J.: Numerical model of cutting tool blade wear. J. Eng. Sci. 8(2), A1–A5 (2021). https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(2).a1

78 Tang, T., Liu, C., Wang, R.: Optimization of honing surface roughness of carburized holes based on GRA-RSM. Machines 9, 291 (2021). https://doi.org/10.3390/machines9110291

79 Tchigirinsky, J., Chigirinskaya, N., Evtyunin, A.: Stability assessment methods of technological processes. In: Proceedings of the MATEC Web of Conferences, vol. 346, p. 03013 (2021). https://doi.org/10.1051/matecconf/202134603013

80 Ivanov, V., Dehtiarov, I., Denysenko, Y., Malovana, N., Martynova, N.: Experimental diagnostic research of fixture. Diagnostyka 19(3), 3–9 (2018). https://doi.org/10.29354/diag/92293

81 Лоскутов В.Ф., Хижняк В.Г. Нанесение карбида ниобия на поверхность инструментальных сталей. Изв. вузов Чер. металлургия, 1979 №4, с.91-93.

82 СПОСІБ ДИФУЗІЙНОЇ МЕТАЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ : Патент України на корисну модель / Харченко Надія Анатоліївна (UA); Дегула Андрій Іванович (UA); Івченко Олександр Володимирович (UA); Панченко Віталій Олександрович (UA); Мелейчук Станіслав Станіславович (UA); Жигилій Дмитро Олексійович (UA); Іванов Віталій Олександрович (UA); Павленко Іван Володимирович (UA); Чумаков Дмитро Сергійович (UA); Негреба Нікіта Юрійович (UA); Ольховик Катерина Євгенівна (UA); Кайдаш Дмитро Віталійович (UA); Кравченко Віталій Вікторович (UA); Лоскутова Тетяна Володимирівна (UA); Погребова Інна Сергіївна (UA); Рясна Ольга Василівна (UA); Ткаченко Олександр Володимирович (UA); Антонов Анатолій Павлович (UA). - Україна. - № 151778, МПК C23C 12/00, C23C 8/24, заявл. 22.10.2021, опубл. 15.09.2022, бюл. № 37.

83 Диффузионные карбидные покрытия. В.Ф. Лоскутов, В.Г. Хижняк, Ю.А. Куницкий, М.В. Киндрачук, К.:Тэхника, 1991 –168 с.

84 Lesyk, D.A.; Mordyuk, B.N.; Martinez, S.; Iefimov, M.O.; Dzhemelinskyi, V.V.; Lamikiz, A. Influence of combined laser heat treatment and ultrasonic impact treatment on microstructure and corrosion behavior of AISI 1045 steel. Surf. Coat. Technol. 2020, 401, 126275.

85 Pakhomova, S.; Karpukhin, S. Technological bases for increasing the durability of aviation parts by chemical heat treatment. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing: Moscow, Russia, 2020; Volume 963, p. 12006.

86 Touggui, Y.; Belhadi, S.; Mechraoui, S.E.; Uysal, A.; Yallese, M.A.; Temmar, M. Multi-objective optimization of turning parameters for targeting surface roughness and maximizing material removal rate in dry turning of AISI 316L with PVD-coated cermet insert. SN Appl. Sci. 2020, 2, 1360.

87 Kostyk, K.; Kostyk, V.; Akimov, O.; Kamchatna-Stepanova, K.; Shyrokyi, Y. Ensuring the High Strength Characteristics of the Surface Layers of Steel Products. In Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner-2021; Lecture Notes in Mechanical Engineering; Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I., Eds.; Springer: Cham, Switzerand, 2022; pp. 292–301.

88 Ghara, T.; Paul, S.; Bandyopadhyay, P.P. Effect of Grit Blasting Parameters on Surface and Near-Surface Properties of Different Metal Alloys. J. Therm. Spray Technol. 2021, 30, 251–269.

89 Kostyk, K.O.; Kostyk, V.O.; Kovalev, V.D. Strengthening the surface layer of tools with state-of-the-art technologies. Prog. Phys. Met. 2021, 22, 78–102.

90 Ba, Q.; Song, R.; Zhou, N.; Pei, Z.; Feng, Y.; Song, R. Revealing working hardening behavior and substructure evolutions of ultrahigh strength and enhanced wear resistance Fe–25Mn–7Al–1C steel treated by explosion processing. J. Mater. Sci. 2020, 55, 1256–1268.

91 Kamhuber, F.; Sobottka, T.; Heinzl, B.; Henjes, J.; Sihn, W. An efficient hybrid multi-criteria optimization approach for rolling production smoothing of a European food manufacturer. Comput. Ind. Eng. 2020, 147, 106620.

92 Xu, X.; Cao, D.; Wang, Z.; Liu, J.; Gao, J.; Sanchuan, M.; Wang, Z. Study on ultrasonic treatment for municipal sludge. Ultrason. Sonochem. 2019, 57, 29–37.

93 Ni, C.; Zhu, L.; Yang, Z. Comparative investigation of tool wear mechanism and corresponding machined surface characterization in feed-direction ultrasonic vibration assisted milling of Ti–6Al–4V from dynamic view. Wear 2019, 436, 203006.

94 Hein, S.; Petzold, R.; Suarez-Ibarrola, R.; Müller, P.F.; Schoenthaler, M.; Miernik, A. Thermal effects of Ho:YAG laser lithotripsy during retrograde intrarenal

surgery and percutaneous nephrolithotomy in an ex vivo porcine kidney model. World J. Urol. 2020, 38, 753–760.

95 Maharjan, N.; Zhou, W.; Wu, N. Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere. Surf. Coat. Technol. 2020, 385, 125399.

96 Ivanov, Y.; Gromov, V.; Zaguliaev, D.; Glezer, A.; Sundeev, R.; Rubannikova, Y.; Semin, A. Modification of surface layer of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying followed by electron beam processing. Mater. Lett. 2019, 253, 55–58.

97 Kara, F.; Karabatak, M.; Ayyıldız, M.; Nas, E. Effect of machinability, microstructure and hardness of deep cryogenic treatment in hard turning of AISI D2 steel with ceramic cutting. J. Mater. Res. Technol. 2020, 9, 969–983.

98 Feistle, M.; Koslow, I.; Krinninger, M.; Golle, R.; Volk, W. Reduction of burr formation for conventional shear cutting of boron-alloyed sheets through focused heat treatment. Procedia CIRP 2017, 63, 493–498.

99 Lyalyakin, V.P.; Aulov, V.A.; Ishkov, A.V.; Trokhin, A.Y.; Slinko, D.B. Technology of borating hardening of the chaff-cutter drum knives in a grain harvester combine. Russ. Metall. 2019, 1492–1496.

100 Liu, R.L.; Yan, F.; Yan, M.F. Surface grain nanocrystallization of Fe-Cr-Ni alloy steel by plasma thermochemical treatment. Surf. Coat. Technol. 2019, 370, 136–143.

101 Tang, S.; Li, P.; Liu, D.; Li, P.; Niu, Q. Cutting performance of a functionally graded cemented carbide tool prepared by microwave heating and nitriding sintering. High Temp. Mater. Process. 2019, 38, 582–589.

102 Cisquini, P.; Ramos, S.V.; Viana, P.R.P.; de Freitas Cunha Lins, V.; Franco, A.R., Jr.; Vieira, E.A. Effect of the roughness produced by plasma nitrocarburizing on corrosion resistance of AISI 304 austenitic stainless steel. J. Mater. Res. Technol. 2019, 8, 1897–1906.

103 Türkmen, İ.; Yalamaç, E.; Keddam, M. Investigation of tribological behaviour and diffusion model of Fe2B layer formed by pack-boriding on SAE 1020 steel. Surf. Coat. Technol. 2019, 377, 124888.

104 Budzynski, P.; Kara, L.; Küçükömeroğlu, T.; Kaminski, M. The influence of nitrogen implantation on tribological properties of AISI H11
steel. Vacuum 2015, 122, 230–235.

105 Yang, N.; Li, S.; Yuan, X.; Ye, X.; Sang, X.; Liu, C.; Li, H. Driving-in effect and gettering degradation induced by laser doping using borosilicate glass as dopant source. J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2019, 30, 6895–6901.

106 Konoplianchenko, I.; Tarelnyk, V.; Martsynkovskyy, V.; Belous, A.; Gerasimenko, V.; Smolyarov, G.; Tolbatov, A.; Tolbatov, V.; Chuprina, M. Changing cohesive energy between atoms in metal-to-metal transition layer for Fe–Sn and Fe–Cu–Sn compounds in the course of spark alloying process.
In Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019); Springer Proceedings in Physics; Pogrebnjak, A., Bondar, O., Eds.; Springer: Singapore, 2020; Volume 240.

107 Hou, R.; Li, L.; Fang, X.; Zhao, H.; Chen, Y.; Xie, Z.; Sun, G.; Zhang, X.; Zhao, Y.; Huang, R.; et al. Ultra-shallow doping B, Mg, Ni, Cu, Mn, Cr and Fe into SiC with very high surface concentrations based on plasma stimulated room-temperature diffusion. J. Mater. Eng. Perform. 2019, 28, 162–168.

108 Anusha, E.; Kumar, A.; Shariff, S.M. A novel method of laser surface hardening treatment inducing different thermal processing condition for Thin-sectioned 100Cr6 steel. Opt. Laser Technol. 2020, 125, 106061.

109 Mencik, J. Mechanics of Components with Treated or Coated Surfaces; Springer Science & Business Media: Dordrecht, The Netherlands, 1996; Volume 42, ISBN 978-90-481-4611-6.

110 Vereschaka, A.A.; Volosova, M.A.; Batako, A.D.; Vereshchaka, A.S.; Mokritskii, B.Y. Development of wear-resistant coatings compounds for high-speed

steel tool using a combined cathodic vacuum arc deposition. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016, 84, 1471–1482.

111 Johnston, J.M.; Jubinsky, M.; Catledge, S.A. Plasma boriding of a cobalt–chromium alloy as an interlayer for nanostructured diamond growth. Appl. Surf. Sci. 2015, 328, 133–139.

112 Idan Alaa Fadhil, I.; Akimov, O.; Kostyk, K. Development of a combined technology for hardening the surface layer of steel 38Cr2MoAl. East. Eur. J. Enterp. Technol. 2017, 2, 56–62.

113 Batal, A.; Michalek, A.; Penchev, P.; Kupisiewicz, A.; Dimov, S. Laser processing of freeform surfaces: A new approach based on an efficient workpiece partitioning strategy. Int. J. Mach. Tools Manuf. 2020, 156, 103593.

114 Fraczek, T.; Ogorek, M.; Skuza, Z.; Prusak, R. Mechanism of ion nitriding of 316L austenitic steel by active screen method in a hydrogen-nitrogen atmosphere. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2020, 109, 1357–1368.

115 Bendikiene, R.; Ciuplys, A.; Kavaliauskiene, L. Circular economy practice: From industrial metal waste to production of high wear resistant coatings. J. Clean. Prod. 2019, 229, 1225–1232.

116 Eryomina, M.A.; Lomayeva, S.F.; Kharanzhevskiy, E.V.; Burnyshev, I.N. Peculiarities of phase formation in the mechanosynthesized titanium carbohydride powders under short pulse selective laser alloying. Eur. Phys. J. Spec. Top. 2020, 229, 187–195.

117 Zhao, W.; Liu, D.; Qin, H.; Zhang, X.; Zhang, H.; Zhang, R.; Ren, Z.; Ma, C.; Amanov, A.; Pyun, Y.S.; et al. The effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on low temperature nitriding of ultra-high strength steel. Surf. Coat. Technol. 2019, 375, 205–214.

118 Safonov, S.V.; Smolentsev, V.P.; Mandrykin, A.V. The methodology of manufacturability testing in launching high-tech products of aerospace engineering into production. Mater. Today Proc. 2019, 19, 2526–2528.

119 Alifanov, A.V.; Popova, Z.A.; Zionenko, N.M. The mechanism of hardening of alloyed steels in the pulsed magnetic field. Cast. Metall. 2012, 4, 151–155.
120 Kovalev, V.D.; Vasilchenko, Y.V.; Klimenko, G.P.; Andronov, A.Y.; Tkachenko, N.A. Application of pulsed magnetic field treatment for hardening of machine parts and cutting tools. Bull. Eng. Build. 2004, 4, 149–151.
121 Mohanad Muzahem Khalaf Kostyk, V.; Demin, D.; Kostyk, K. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding. East Eur. J. Adv. Technol. 2016, 2, 45–49.
122 Mamonova, A.; Bagliuk, G. Formation of crystal structure in hot forging of powder carbon steels. Powder Metall. Met. Ceram. 2020, 59, 232–238.
123 Soroka, A.; Rodichev, Y.; Kovalev, V.; Vasilchenko, Y. Hardening of carbide cutting tools for heavy engineering based on surface and bulk modification by physical methods. Mech. Mater. 2013, 71, 133–145.
124 Cisquini, P.; Ramos, S.V.; Viana, P.R.P.; de Freitas Cunha Lins, V.; Franco, A.R., Jr.; Vieira, E.A. Effect of the roughness produced by plasma nitrocarburizing on corrosion resistance of AISI 304 austenitic stainless steel. J. Mater. Res. Technol. 2019, 8, 1897–1906.
125 Alifanov, A.V. Magnetic-impulse hardening treatment of metal products. In Proceedings of the 10th Conference on Technology of Repair, Restoration and Hardening of Machine Parts, Mechanisms, Tools and Tooling, St. Petersburg, Russia, 10–13 April 2007; Volume 2, pp. 9–15.
126 Kulesh, E.A.; Piliptsou, D.G.; Rogachev, A.V.; Hong, J.X.; Fedosenko, N.N.; Kolesnyk, V. Boron-carbon coatings: Structure, morphology and mechanical properties. J. Eng. Sci. 2020, 7, C1–C9.
127 Kostyk, K.O. Research of influence of gas nitriding duration on formation of diffusion layer of steel 20Kh2N4A. Proc. Odessa Polytech. Univ. 2015, 2, 14–18.
128 Ivanov, I.V.; Mohylenets, M.V.; Dumenko, K.A.; Kryvchyk, L.; Khokhlova, T.S.; Pinchuk, V.L. Carbonitration of a tool for pressing stainless steel pipes. J. Eng. Sci. 2020, 7, C17–C21.

129 Kostyk, V.A.; Kostyk, K.O.; Dolzhenko, A.S. Surface hardening of details of cars and tractors by the method of low-temperature nitrocarburizing powder in medium. Mot. Transp. 2013, 33, 115–119.

130 Umanskyi, O.P.; Storozhenko, M.S.; Terentiev, O.E.; Tarelnyk, V.B.; Krasovskyy, V.P.; Sheludko, V.E.; Martsenyuk, I.S.; Kostenko, O.D. Influence of titanium diboride particles size on the structure of TiB2-(Fe-Mo) composite materials. Funct. Mater. 2020, 27, 354–362.

131 Kostyk, K.O. Development of high-speed technology brovana alloy steel. East Eur. J. Adv. Technol. 2015, 6, 8–15.

132 Hovorun, T.P.; Berladir, K.V.; Bilous, O.A.; Lyubich, O.I.; Vorobiov, S.I. Development of alloy resistant in conditions of abrasive wear. Funct. Mater. 2021, 28, 170–177.

133 Konoplianchenko, I.; Tarelnyk, V.; Gaponova, O.; Bondarev, S.; Vasilenko, O.; Belous, A.; Smolyarov, G.; Semirnenko, Y.; Zhang, Z.; Mikulina, M.; et al. Increasing the Efficiency of Running-in the Titanium Nitride Nanostructures Formed on R6M5 and 12KH18N10T Steels by Sulphidizing with Electric Spark Alloying Method. In Proceedings of the 2020 IEEE 10th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2020, Sumy, Ukraine, 9–13 November 2020; p. 9309700.

134 Idan Alaa Fadhil, I.; Akimov, O.V.; Kostyk, K.O. The innovative technology of high-speed nitriding steel. In Herald of NTU “KHPI” Series: New Solutions in Modern Technologies; Collection of Scientific Works; National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”: Kharkiv, Ukraine, 2016; Volume 42, pp. 49–53.

135 Bitay, E.; Tóth, L.; Kovács, T.A.; Nyikes, Z.; Gergely, A.L. Experimental Study on the Influence of TiN/AlTiN PVD Layer on the Surface Characteristics of Hot Work Tool Steel. Appl. Sci. 2021, 11, 9309.

136 Inoue, S.; Uchida, H.; Hioki, A.; Koterazawa, K.; Howson, R.P. Structure and composition of (Ti, Al)N films prepared by r.f. planar magnetron sputtering using a composite target. Thin Solid Films 1995, 271, 15–18.

137 Jehn, H.A. Multicomponent and multiphase hard coatings for tribological applications. Surf. Coat. Technol. 2000, 131, 433–440.
138 Kohlscheen, J.; Bareiss, C. Effect of hexagonal phase content on wear behaviour of AlTiN arc PVD coatings. Coatings 2018, 8, 72.
139 Su, J.; Boichot, R.; Blanquet, E.; Mercier, F.; Pons, M. Chemical vapor deposition of titanium nitride thin films: Kinetics and experiments. CrystEngComm 2019, 21, 3974–3981.
140 Arai, T.; Moriyama, S. Growth behavior of chromium carbide and niobium carbide layers on steel substrate, obtained by salt bath immersion coating process. Thin Solid Films 1995, 259, 174–180.
141 Fan, X.S.; Yang, Z.G.; Zhang, C.; Zhang, Y.D.; Che, H.Q. Evaluation of vanadium carbide coatings on AISI H13 obtained by thermo-reactive deposition/diffusion technique. Surf. Coat. Technol. 2010, 20, 641–646.
142 Chabak, Y.G.; Fedun, V.I.; Pastukhova, T.V.; Zurnadzhy, V.I.; Berezhnyy, S.P.; Efremenko, V.G. Modification of steel surface by pulsed plasma heating. Probl. At. Sci. Technol. 2017, 110, 97–102.
143 Oskolkova, T.N.; Glezer, A.M. Surface hardening of hard tungsten-carbide alloys: A review. Steel Transl. 2017, 47, 788–796.
144 Kostyk, K.; Kuric, I.; Saga, M.; Kostyk, V.; Ivanov, V.; Kovalov, V.; Pavlenko, I. Impact of magnetic-pulse and chemical-thermal treatment on alloyed steels’ surface layer. Appl. Sci. 2022, 12, 469.
145 Kowalski, S. Influence of diamond-like carbon coatings on the wear of the press joint components. Wear 2021, 486–487, 204076.
146 Kameneva, A.; Antonova, N.; Pesin, M.; Makarov, V.; Nikitin, S.; Bublik, N. Structural and phase transformations control in Ti and Al cathode materials, WC-Co substrate, and Ti1-xAlxN coating to improve their physico-mechanical and wear properties. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2022, 102, 105726.

147 Kowalski, S. The influence of selected PVD coatings on fretting wear in a clamped joint based on the example of a rail vehicle wheel set. Eksploat. Niezawodn. 2018, 20, 1–8.

148 Von Fieandt, L.; Larsson, T.; Lindahl, E.; Bäcke, O.; Boman, M. Chemical vapor deposition of TiN on transition metal substrates. Surf. Coat. Technol. 2018, 334, 373–383.

149 Richter, V.; Potthoff, A.; Pompe, W.; Gelinsky, M.; Ikonomidou, H.; Bastian, S.; Schirmer, K.; Scholz, S.; Hofinger, J. Evaluation of health risks of nano- and microparticles. Powder Met. 2008, 51, 8–9.

150 Chen, J.-K.; Chen, S.-F.; Huang, C.-S. Formation of Al and Cr dual coatings by pack cementation on SNCM439 steel. ISIJ Int. 2012, 52, 127–133.

151 Geib, F.D.; Rapp, R.A. Simultaneous chromizing–Aluminizing coating of low-alloy steels by a halide-activated, pack-cementation process. Oxid. Met. 1993, 40, 213–228.

152 Mei, S.Q.; Guryev, A.M.; Ivanov, S.G.; Lygdenov, B.D.; Tsydypov, B.S.; He, X.Z.; Liang, Q.Y. Research on the chance of increasing the wear resistance of high-speed steel using chemical thermal treatment methods. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019, 479, 012055.

153 Petkov, N.; Bakalova, T.; Bahchedzhiev, H.; Louda, P.; Kejzlar, P.; Capkova, P.; Kormunda, M.; Rysanek, P. Cathodic arc deposition of TiCN coatings-influence of the C2H2/N2 ratio on the structure and coating properties. J. Nano Res. 2018, 51, 78–91.

154 Trotsan, A.I.; Kaverinskii, V.V.; Brodetskii, I.L. Use of fine powders of refractory carbides and nitrides for inoculation of iron-carbon alloys. Powder Metall. Met. Ceram. 2014, 52, 600–605.

155 Fan, Y.; Li, L.; Zhang, Y.; Zhang, X.; Geng, D.; Hu, W. Recent advances in growth of transition metal carbides and nitrides (MXenes) crystals. Adv. Funct. Mater. 2022, 2022, 2111357.

156 Zhu, L.; Feng, C.; Zhu, S.; Wang, F.; Yuan, J.; Wang, P. Comparison of CrN, AlN and TiN diffusion barriers on the interdiffusion and oxidation behaviors of Ni+CrAlYSiN nanocomposite coatings. Crystals 2021, 11, 1333.
157 Fox-Rabinovich, G.S.; Wilkinson, D.S.; Veldhuis, S.C.; Dosbaeva, G.K.; Weatherly, G.C. Oxidation resistant Ti-Al-Cr alloy for protective coating applications. Intermetallics 2006, 14, 189–197.
158 Zhou, C.; Yang, Y.; Gong, S.; Xu, H. Effect of Ti–Al–Cr coatings on the high temperature oxidation behavior of TiAl alloys. Mater. Sci. Eng. A 2001, 307, 182–187.
159 Grachev, V.A.; Rozen, A.E.; Perelygin, Y.P.; Kireev, S.Y.; Los, I.S. Multilayer corrosion-resistant material based on iron–carbon alloys. Heliyon 2020, 6, e04039.
160 Joshi, A.; Hu, H.S. Oxidation behavior of titanium-aluminium nitrides. Surf. Coat. Technol. 1995, 76–77, 499–507.
161 Genova, V.; Paglia, L.; Pulci, G.; Bartuli, C.; Marra, F. Diffusion aluminide coatings for hot corrosion and oxidation protection of nickel-based superalloys: Effect of fluoride-based activator salts. Coatings 2021, 11, 412.
162 Tarelnyk, V.B.; Gaponova, O.P.; Loboda, V.B.; Konoplyanchenko, E.V.; Martsinkovskii, V.S.; Semirnenko, Y.I.; Tarelnyk, N.V.; Mikulina, M.A.; Sarzhanov, B.A. Improving ecological safety when forming wear-resistant coatings on the surfaces of rotation body parts of 12Kh18N10T steel using a combined technology based on electrospark alloying. Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2021, 57, 173–184.
163 Chintha, A.R. Metallurgical aspects of steels designed to resist abrasion, and impact-abrasion wear. Mater. Sci. Technol. 2019, 35, 1133–1148.
164 Vencl, A.; Vucetic, F.; Bobic, B.; Pitel, J.; Bobic, I. Tribological characterisation in dry sliding conditions of compocasted hybrid A356/SiCp/Grp composites with graphite macroparticles. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019, 100, 2135–2146.

165 Hand-E Adaptive Gripper [Електронний ресурс]. URL: https://robotiq.com/products/hand-e-adaptive-robot-gripper (дата звернення: 13.10.2021).

166 Robot grippers / під ред. G. J. Monkman. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. 452 с.

167 Ю. В. Хмельницкий, Захватные устройства промышленных роботов. К.: УМК ВО, 1990

168 CHELIC – Gripper [Електронний ресурс]. URL: https://www.chelic.com/website/en/products-GRin-4.html (дата звернення: 20.10.2012).

169 Weckenborg, C., Spengler, T. S. (2019). Assembly line balancing with collaborative robots under consideration of ergonomics: A cost-oriented approach. IFAC-PapersOnLine, Vol. 52(13), pp. 1860-1865.

170 IFR International Federation of Robotics. Available online: https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-sales-rise-again.

171 Çil, Z.A. et al. (2020). Mathematical model and bee algorithms for mixed-model assembly line balancing problem with physical human-robot collaboration. Applied Soft Computing, Vol. 93, 106394.

172 Dalle Mura, M., Dini, G. (2019), Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach. CIRP Annals, Vol. 68(1), pp. 1-4.

173 Tlach, V. et al. (2019). Collaborative assembly task realization using selected type of a human-robot interaction. Transportation Research Procedia, Vol. 40, pp. 541-547.

174 Borges, G. D. et al. (2021). Decision-making framework for implementing safer human-robot collaboration workstations: System dynamics modeling. Safety, Vol. 7(4), 75.

175 Cherubini, A. et al. (2016). Collaborative manufacturing with physical human–robot interaction. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 40, pp. 1-13.

176 Collaborative Robots. ABB Robotics. Available online: https://new.abb.com/products/robotics/collaborative-robots.

177 Nourmohammadi, A., Fathi, M., Ng, A. H. C. (2022). Balancing and scheduling assembly lines with human-robot collaboration tasks. Computers and Operations Research, Vol. 140, 105674.

178 How Human-Robot Teamwork Will Upend Manufacturing. MIT Technology Review. Available online: https://www.technologyreview.com/2014/09/16/171369/how-human-robot-teamwork-will-upend-manufacturing.

179 Al-Yacoub, A. et al. (2021). Improving human robot collaboration through force/torque based learning for object manipulation. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 69, 102111.

180 Hjorth, S., Chrysostomou, D. (2022). Human–robot collaboration in industrial environments: A literature review on non-destructive disassembly. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 73, 102208.

181 Hentout, A. et al. (2019). Human-robot interaction in industrial collaborative robotics: A literature review of the decade 2008-2017. Advanced Robotics, Vol. 33(15-16), pp. 764-799.

182 Michalos, G. et al. (2015). Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces, Vol. 37, pp. 248-253.

183 The Future of Collaborative Robots. Automate. Available online: https://www.automate.org/a3-content/future-of-collaborative-robots.

184 Delta X - Affordable & Efficient Delta Robot Series. Delta X Robot Store. Available online: https://store.deltaxrobot.com.

185 Gripper. Festo Croatia. Available online: https://www.festo.com/cms/hr_hr/70021.htm.

186 Perakovic, D. et al.: Internet of Things Concept for Informing Visually Impaired Persons in Smart Factory Environments, In: Industry 4.0: Trends in

Management of Intelligent Manufacturing Systems, p.69-86. (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-030-14011-3_7

187 Husár, J., Knapciková, L.:,Exploitation of Augumented Reality in the Industry 4.0 Concept for the Student Educational Process, In: INTED 2019 : The 13th annual International Technology, Education and Development Conference, IATED, pp. 4797-4805, (2019). https://doi.org/10.21125/inted.2019.1195

188 Grabara, J., et al.: Impact of legal standards on logistics management in the context of sustainable development, Acta Logistica 7(1), 31-37 (2020). https://doi.org/10.22306/al.v7i1.155

189 Kliment, M., et al.: Production Efficiency Evaluation and Products' Quality Improvement using Simulation. International journal of simulation modelling 19(3), 470-481 (2020). https://doi.org/10.2507/IJSIMM19-3-528

190 Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Gusak, O., Pavlenko, V.: Determination of contact points between workpiece and fixture elements as a tool for augmented reality in fixture design. Wireless Networks, 27(3), 1657-1664. (2021). https://doi.org/10.1007/s11276-019-02026-2

191 Costa, R.; Neves, J.; Novais, P.; Machado, J.; Lima, L.; Alberto, C.: Intelligent mixed reality for the creation of ambient assisted living. In: Portuguese Conference on Artificial Intelligence (pp. 323-331). Springer, Berlin, Heidelberg. (2007) https://doi.org/10.1007/978-3-540-77002-2_27

192 Židek, K. et al. : Recognition of Assembly Parts by Convolutional Neural Networks, Advances in Manufacturing Engineering and Materials: ICMEM 2018, Cham: Springer, 281-289., (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-319-99353-9_30

193 Straka, M.; Rosova, A.et al.: Principles of computer simulation design for the needs of improvement of the raw materials combined transport system. Acta Montanistica Slovaca. Vol.23, (2018).

194 Malindzakova, M.; Straka, M.; Rosova, A.; Kanuchova, M.; Trebuna, P.: Modeling the process for incineration of municipal waste, Przemysl Chemiczny,Vol. 94 (8), (2015). https://doi.org/10.15199/62.2015.8.4

195 Sinay, J.; Kotianova, Z.; Balazikova, M.; Markulik, S.; Kotianova, Z.: Measurement of low-frequency noise during CNC machining and its assessment. Measurement. Vol. 119, (2018). https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.004

196 Luscinski, S.; Ivanov, V.: A Simulation Study of Industry 4.0 Factor on the Ontology on Flexibility with Using Flexim (R) Software. Management and Production Engineering Review, Vol.11 (3) pp. 74-83 (2020). https://doi.org/10.24425/mper.2020.134934

197 Perakovic, D. et al.: Information and Communication Technologies Within Industry 4.0 Concept, In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_14

198 Židek, K. et al.: Digital Twin of Experimental Smart Manufacturing Assembly System for Industry 4.0 Concept. Sustainability 13(9), 3658 (2020). https://doi.org/10.3390/su12093658

199 Tokorova, M. et al.: Augmented Reality as a Support Tool in Machining Process, Tem Journal, 9(1), 407-411 (2020). https://doi.org/10.18421/TEM91-56

200 Kascak, J. et al. Implementation of Augmented Reality into the Training and Educational Process in Order to Support Spatial Perception in Technical Documentation, In: IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), pp.583-587. IEEE, Tokio (2019). https://doi.org/10.1109/IEA.2019.8715120

201 Buń, P.; Trojanowska, J.; Ivanov, V.; Pavlenko, I.: The use of virtual reality training application to increase the effectiveness of workshops in the field of lean manufacturing. In 4th International Conference of the Virtual and Augmented Reality in Education, VARE 2018 (pp. 65-71). (2018).

202 Luscinski, S.: Digital Twinning for Smart Industry, MMS 2018: 3rd EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems. 2016-224. (2018). https://doi.org/10.4108/eai.6-11-2018.2279986

203 Husár, J.; Knapčíková, L.; Hrehová, S.: Augmented Reality as a Tool of Increasing the Efficiency of RFID Technology. Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures. FABULOUS 2021. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol 382 pp. 401-414 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-78459-1_30

204 Knapčíková, L.; Husár, J.; Behúnová, A.; Hrehová, S.: Augmented Reality as a Tool of Increasing of Competitiveness of Enterprise. Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures. FABULOUS 2021. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol. 382 pp. 337-349 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-78459-1_25

205 Maščenik, J.: Experimental determination of cutting speed influence on cutting surface character in material laser cutting. MM Science Journal, 960-963 (2016). https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_09_201639

206 Coranic, T., Gaspar, S., Pasko, J.: Utilization of Optimization of Internal Topology in Manufacturing of Injection Moulds by the DMLS Technology. Applied Sciences, 11(1), 262. (2021). https://doi.org/10.3390/app11010262

207 Kujawińska, A.; Diering,M.: The impact of the organization of the visual inspection process on its effectiveness, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, JAMT-D-20-02941R1; vol. 112, pp. 1295-1306 (2021). https://doi.org/10.1007/s00170-020-06543-9

208 Trojanowska, J.; Kolinski, A.; Galusik, D.; Varela, M. L. R.; Machado, J.: A Methodology of improvement of manufacturing productivity through increasing operational efficiency of the production process Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2018, (201519), pp. 23–32 (2018). https://doi.org/10.1007/978-3-319-68619-6_3

209 Hayati, S., Shahrokhi, M., Hedayati, A.: Development of a frictionally damped boring bar for chatter suppression in boring process. The International Journal of

Advanced Manufacturing Technology 113(9–10), 2761–2778 (2021). https://doi.org/10.1007/s00170-021-06791-3

210 Suyama, D.I., Diniz, A.E., Pederiva, R.: The use of carbide and particle-damped bars to increase tool overhang in the internal turning of hardened steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 86(5–8), 2083–2092 (2016). https://doi.org/10.1007/s00170-015-8328-z

211 Ivanov, V., Dehtiarov, I., Pavlenko, I., Kosov, M., Hatala, M.: Technological Assurance and Features of Fork-Type Parts Machining. In: Ivanov, V., et al. (eds.) DSMIE 2019. LNME, pp. 114–125. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_12

212 Ivanov, V., Pavlenko, I., Kuric, I., Kosov, M.: Mathematical Modeling and Numerical Simulation of Fixtures for Fork-Type Parts Manufacturing. In: Knapˇcнkovб, L., Balog, M. (eds.) Industry 4.0: Trends in Management of Intelligent Manufacturing Systems. EICC, pp. 133–142. Springer, Cham (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-030-14011-3_12

213 Kalinrski, K.J., Galewski, M.A., Mazur, M.R., Stawicka-Morawska, N.: An improved method of minimizing tool vibration during boring holes in large-size structures. Mater. 14(16) (2021). DOI: https://doi.org/10.3390/ma14164491

214 Oborskyi, G., Orgiyan, A., Tonkonogyi, V., Balaniuk, A., Muraviova, I.: Dynamics of Fine Boring with Multicutting Console Drilling Rods. In: Tonkonogyi, V., et al. (eds.) InterPartner 2020. LNME, pp. 577–587. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_56

215 Kiyak, M., Kaner, B., Sahin, I., Aldemir, B., Cakir, O.: The dependence of tool overhang on surface quality and tool wear in the turning process. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 51(5–8), 431–438 (2010). https://doi.org/10.1007/s00170-010-2654-y

216 Shvets, S.V., Machado, J.: Numerical model of cutting tool blade wear. J. Eng. Sci. 8(2), A1–A5 (2021). https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(2).a1

217 Hessainia, Z., Belbah, A., Yallese, M.A., Mabrouki, T., Rigal, J.-F.: On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and

tool vibrations. Measurement: J. Int. Meas. Confederation 46(5) (2013). DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.12.016

218 Krol, O., Porkuian, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters. Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences 72(11), 1546–1556 (2019). https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12

219 Alammari, Y., Sanati, M., Freiheit, T., Park, S.S.: Investigation of boring bar dynamics for chatter suppression. Procedia Manuf. 1, 768–778 (2015). https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.059

220 Wojciechowski, S., Twardowski, P., Pelic, M.: Cutting forces and vibrations during ball end milling of inclined surfaces. Procedia CIRP 14, 113–118 (2014). https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.102

221 Wojciechowski, S., Twardowski, P., Pelic, M.: Cutting forces and vibrations during ball end milling of inclined surfaces. Procedia CIRP 14, 113–118 (2014). https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.102

222 Song, Q., Shi, J., Liu, Z., Wan, Y., Xia, F.: Boring bar with constrained layer damper for improving process stability. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 83(9–12), 1951–1966 (2015). https://doi.org/10.1007/s00170-015-7670-5

223 Basovich, S., Arogeti, S.: Identification and robust control for regenerative chatter in internal turning with simultaneous compensation of machining error. Mech. Syst. Signal Process. 149(2021). DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107208

224 Reith, M.J., Bachrathy, D., Stepan, G.: Improving the stability of multi-cutter turning with detuned dynamics. Mach. Sci. Technol. 20(3), 440–459 (2016). https://doi.org/10.1080/10910344.2016.1191029

225 Sastry, C.C., Hariharan, P., Pradeep Kumar, M., Muthu Manickam, M.A.: Experimental investigation on boring of HSLA ASTM A36 steel under dry, wet, and cryogenic environments. Mater. Manuf. Processes 34(12), 1352–1379 (2019). https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1643477

226 Oborskyi, G., Orgiyan, A., Tonkonogyi, V., Aymen, A., Balaniuk, A.: Study of dynamic impacts at combined operations of the thin turning and boring. In: Tonkonogyi, V., et al. (eds.) InterPartner 2019. LNME, pp. 226-235. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10. 1007/978-3-030-40724-7_23

227 Siddhpura, M., Paurobally, R.: Experimental investigation of chattee vibrations in facing and turning processes. Int. J. Meeh. Aerosp. Ind. Mechatron. Manuf. Eng. 7(6), 968-973 (2013)

228 Lebedev, V.A., Solomiichuk, T.G., Novykov, S.V.: Study of a welding pool harmonic oscillations influence on the welded metal hardness and weld bead width. J. Eng. Sci. 6(1), C16-C21 (2019). https://doi.org/10.21272/jefs2l0119.fi(l).c4

229 Pavlenko, I., et al.: Parameter identification of cutting forces in crankshaft grinding using artificial neural networks. Materials 13(23), 5357 (2020). https://doi.org/10.3390/ mal3235357

230 Ostling, D., Tormod, I., Tjomsland, M., Standal, O., Mugaas, N.: Cutting process monitoring with an instrumented boring bar measuring cutting force and vibration. Procedia GIRP 77, 235-238 (2018). https://doi.org/10.1016/j.pro.cir.2018.09.004

231 Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Gusak, O., Pavlenko, V.: Determination of contact points between workpiece and fixture elements as a tool for augmented reality in fixture design. Wireless Netw. 27(3), 1657-1664 (2019). https:// doi.org /10.1007/s11276- 019-02026-2

232 Mohan, E., Mamundi Azaath, L., Marichamy, S., Dhinakaran, V.: The effect of impact damper on vibration control in internal turning operation. AIP Conf. Proc. 2283, 020061 (2020). https://doi.org/10.1063/5.0025023

233 Shvets, S.V., Astakhov, V.P.: Effect of insert angles on cutting tool geometry. J. Eng. Sci. 7 (2), A1-A6 (2020). https://doi.org/10.21272/jes.202().7(2)ial

234 Fallah, M., Moetakef-Imani, B.: Investigation on nonlinear dynamics and active control of boring bar chatter. J. Braz. Soc. Meeh. Sci. Eng. 43(3), 1-27 (2021). https://doi.org/10.1007/ s40430-021-02808-w

235 Vishal, K., Saravanamurugan, S., Sanjeev, K., Yedhu, K., Iswar, G., Shanmughasundaram, A.: Vibration control in boring process using a constrained viscoelastic layer damper. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1059, 012031 (2021)

236 Patil, R., Jadhav, S.: Boring parameters optimization for minimum surface roughness using CNC boring machine with passive damping material. In: 2nd International Conference for Convergence in Technology, pp. 300-303 (2017). https://doi.org/10.1109/I2CT.2017. 8226140

237 Kobelev, V.: Efficiency of one- and two-element dynamic vibration dampers. In: Proceedings of the Odessa Polytechnic University, vol. 2, pp. 7-10 (2008)

238 Thorenz, B., Friedrich, M., Westermann, H.-H., Dopper, F.: Evaluation of the influence of different inner cores on the dynamic behavior of boring bars. Procedia CIRP 81, 1171-1176 (2019)

239 Ren, Y., Zhao, Q., Liu, Y., Ma, J.: Analysis of bending vibration characteristics of rotating composite boring bar. J. Phys.: Conf. Ser. 1303(1), 012147 (2019)

240 Grossi, N., Croppi, L., Scippa, A., Campatelli, G.: A dedicated design strategy for active boring bar. Appl. Sci. (Switz.) 9(17), 3541 (2019)

241 Kepczak, N., Bechcinski, G., Rosik, R.: Experimental verification of the deep hole boring bar model. Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability 23(1), 55-62 (2021)

242 Ganapathy, R., Saravanamurugan, S.: Regenerative chatter control in turning process using constrained viscoelastic vibration absorber. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 577(1), 012152 (2019)

243 Rubio, L., Loya, J., Miguelez, M., Fernandez-Saez, J.: Optimization of passive vibration absorbers to reduce chatter in boring. Meeh. Syst. Signal Process. 41(1-2), 691-704 (2013)

244 Saleh, A., Nejatpour, M., Yagci Acar, H., Lazoglu, I.: A new magnetorheological damper for chatter stability of boring tools. J. Mater. Process. Technol. 289, 116931 (2021). https://doi. org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116931

245 Chockalingam, S., Ramabalan, S., Govindan, K.: Chatter control and stability analysis in cantilever boring bar using FEA methods. Materials Today: Proceedings, 33, pp. 2577-2580 (2020). https://doi.org/:10.1016/j.matpr.2019.12.166.

246 Biju, C.V., Shunmugam, M.S. Performance of magnetorheological fluid based tunable frequency boring bar in chatter control. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 140, pp. 407-415 (2019). https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.073

247 Chockalingam, S., Natarajan, U., Selvam, M., Cyril, A.G.: Investigation on Machina-bility and Damping Properties of Nickel–Phosphorus Coated Boring bar. Arabian Journal for Science and Engineering, 41 (2), pp. 669-676 (2016). https://doi.org/10.1007/s13369-015-1830-7

248 Chockalingam, S., Natarajan, U., George Cyril, A.: Damping investigation in boring bar using hybrid copper-zinc particles. JVC/Journal of Vibration and Control, 23 (13), pp. 2128-2134. Цитировано 13. (2017). https://doi.org/10.1177/1077546315610946

249 Ramesh, K., Alwarsamy, T., Jayabal, S.: Investigation of chatter stability in boring tool and tool wear prediction using neural network. International Journal of Materials and Product Technology, 46(1), 47-70 (2013). https://doi.org/10.1504/IJMPT.2013.052789.

250 Ramesh, K., Alwarsamy, T., Jayabal, S.: ANN prediction and RSM optimization of cutting process parameters in boring operations using impact dampers. Journal of Vi-broengineering, 14 (3), pp. 1160-1175 (2012).

251 Rubio, L., Loya, J.A., Miguélez, M.H., Fernández-Sáez, J.: Optimization of passive vibration absorbers to reduce chatter in boring. Mechanical Systems and Signal Pro-cessing, 41(1-2), 691-704 (2013). https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.07.019.

252 Marhadi, K.S., Kinra, V.K.: Particle impact damping: Effect of mass ratio, material, and shape. Journal of Sound and Vibration, 283(1-2), 433-448 (2005). https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.04.013.

253 Thomas, M.D., Knight, W.A., Sadek, M.M.: IMPACT DAMPER AS A METHOD OF IMPROVING CANTILEVER BORING BARS. American Society of Mechanical Engineers (Paper), (74 -WA/DE-9), 8 p. (1974).

254 Lawrance, G., Sam Paul, P., Varadarajan, A.S., Paul Praveen, A., Ajay Vasanth, X.: Attenuation of vibration in boring tool using spring-controlled impact damper. Interna-tional Journal on Interactive Design and Manufacturing, 11(4), 903-915 (2017). https://doi.org/10.1007/s12008-015-0292-1.

255 Sims, N.D., Amarasinghe, A., Ridgway, K.: Particle dampers for workpiece chatter mitigation. American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED, 16-1, 825-832 (2005). https://doi.org/10.1115/IMECE2005-82687.

256 Suyama, D.I., Diniz, A.E., Pederiva, R.: The use of carbide and particle-damped bars to increase tool overhang in the internal turning of hardened steel. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86(5-8), 2083-2092 (2016). https://doi.org/10.1007/s00170-015-8328-z.

257 Song, Q., Shi, J., Liu, Z., Wan, Y., Xia, F.: Boring bar with constrained layer damper for improving process stability. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 83(9-12), 1951-1966 (2016). https://doi.org/10.1007/s00170-015-7670-5.

258 Siddhpura, M., Paurobally, R. A review of chatter vibration research in turning. Inter-national Journal of Machine Tools and Manufacture, 61, 27-47 (2012). https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007.

259 Alammari, Y., Sanati, M., Freiheit, T., Park, S.S.: Investigation of Boring Bar Dynam-ics for Chatter Suppression. Procedia Manufacturing, 1, 768-778 (2015). https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.059

260 Lu, Z., Lu, X., Masri, S.F.: Studies of the performance of particle dampers under dy-namic loads. Journal of Sound and Vibration, 329(26), 5415-5433 (2010). https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.06.027.

261 Pratt, J.R., Nayfeh, A.H.: Chatter control and stability analysis of a cantilever boring bar under regenerative cutting conditions. Philosophical Transactions of the Royal So-ciety A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 359(1781), 759-792 (2001). https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0754.

262 Hessainia, Z., Belbah, A., Yallese, M.A., Mabrouki, T., Rigal, J.-F. On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibra-tions. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 46(5), 1671-1681 (2013). https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.12.016.

263 Oborsky G., Orgiyan A., Tonkonogiy V., Aymen A., Balanyuk A. Investigation of dynamic effects in combined operations of fine turning and boring. In: Tonkonogyi, V., et al. (eds.) Advanced Manufacturing Processes. InterPartner-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 226–235. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_23.

264 Neuenfeldt-Junior, A.; Cheiram, M.; Eckhardt, M.; Scheuera, C.; Siluk, J.; Francescatto, M. (2021). Additive and subtractive rapid prototyping techniques: a comparative analysis of FDM & CNC processes, International Journal of Industrial Engineering and Management, Vol. 12, No. 4, 262-273, doi:10.24867/IJIEM-2021-4-293

265 Vukelic, D.; Simunovic, K.; Kanovic, Z.; Saric, T.; Tadic, B.; Simunovic, G. (2021). Multi-objective optimization of steel AISI 1040 dry turning using genetic algorithm, Neural Computing and Applications, Vol. 33, 12445-12475, doi:10.1007/s00521-021-05877-z

266 Gao, S.; Daaboul, J.; le Duigou, J. (2021). Layout and scheduling optimization problem for a reconfigurable manufacturing system, International Journal of Industrial Engineering and Management, Vol. 12, No. 3, 174-186, doi:10.24867/IJIEM-2021-3-286

267 Noordin, M. Y.; Venkatesh, V. C.; Sharif, S.; Elting, S.; Abdullah, A. (2004). Application of response surface methodology in describing the performance

of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 145, No. 1, 46-58, doi:10.1016/S0924-0136(03)00861-6

268 Bhattacharya, A.; Das, S.; Majumder, P.; Batish, A. (2009). Estimating the effect of cutting parameters on surface finish and power consumption during high speed machining of AISI 1045 steel using Taguchi design and ANOVA, Production Engineering, Research and Development, Vol. 3, No. 1, 31-40, doi:10.1007/s11740-008-0132-2

269 Hwang, Y. K.; Lee, C. M. (2010). Surface roughness and cutting force prediction in MQL and wet turning process of AISI 1045 using design of experiments, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 24, No. 8, 1669-1677, doi:10.1007/s12206-010-0522-1

270 Esteves Correia, A.; Paulo Davim, J. (2011). Surface roughness measurement in turning carbon steel AISI 1045 using wiper inserts, Measurement, Vol. 44, No. 5, 1000-1005, doi:10.1016/ j.measurement.2011.01.018

271 Kohli, A.; Sood, M.; Chawla, A. S. (2011). Fuzzy modeling to simulate surface roughness in CNC turning of AISI 1045 steel, Key Engineering Materials, Vol. 486, 262-265, doi:10.4028/ www.scientific.net/KEM.486.262

272 Senthilkumar, N.; Tamizharasan, T. (2014). Effect of tool geometry in turning AISI 1045 steel: experimental investigation and FEM analysis, Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 39, No. 6, 4963-4975, doi:10.1007/s13369-014-1054-2

273 Senthilkumar, N.; Sudha, J.; Muthukumar, V. (2015). A grey-fuzzy approach for optimizing machining parameters and the approach angle in turning AISI 1045 steel, Advances in Production Engineering & Management, Vol. 10, No. 4, 195-208, doi:10.14743/apem2015.4.202

274 Xiao, Z.; Liao, X.; Long, Z.; Li, M. (2017). Effect of cutting parameters on surface roughness using orthogonal array in hard turning of AISI 1045 steel with YT5

tool, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 93, No. 1, 273-282, doi:10.1007/s00170-016-8933-5

275 Abbas, A. T.; Ragab, A. E.; Benyahia, F.; Soliman, M. S. (2018). Taguchi robust design for optimizing surface roughness of turned AISI 1045 steel considering the tool nose radius and coolant as noise factors, Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2018, Paper 2560253, 9 pages, doi:10.1155/2018/2560253

276 Kimakh, K.; Aghzer, S.; Chouaf, A.; Saoud, A.; Mallil, E. H.; Chergui, M. (2018). Analytical model for predicting surface roughness as a function of AISI 1045 steel machining parameters, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, Vol. 10, No. 1, 57-62

277 Masoudi, S.; Vafadar, A.; Hadad, M.; Jafarian, F. (2018). Experimental investigation into the effects of nozzle position, workpiece hardness, and tool type in MQL turning of AISI 1045 steel, Materials and Manufacturing Processes, Vol. 33, No. 9, 1011-1019, doi:10.1080/ 10426914.2017.1401716

278 Montilla-Montaca, C. A.; Kallewaard-Echeverri, V.; Gonzбlez-Rojas, H. A. (2019). Effect of electropulses on the machinability of a C45E steel, Dyna, Vol. 94, No. 1, 94-99, doi:10.6036/8829

279 Raja, P.; Malayalamurthi, R.; Sakthivel, M. (2019). Experimental investigation of cryogenically treated HSS tool in turning on AISI1045 using fuzzy logic-Taguchi approach, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Vol. 67, No. 4, 687-696, doi:10.24425/ bpasts.2019.130178

280 Camposeco-Negrete, C.; de Dios Calderyn-Nбjera, J. (2019). Sustainable machining as a mean of reducing the environmental impacts related to the energy consumption of the machine tool: a case study of AISI 1045 steel machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 102, No. 1, 27-41, doi:10.1007/s00170-018-3178-0

281 Abbas, A. T.; Gupta, M. K.; Soliman, M. S.; Mia, M.; Hegab, H.; Luqman, M.; Pimenov, D. Y. (2019). Sustainability assessment associated with surface

roughness and power consumption characteristics in nanofluid MQL-assisted turning of AISI 1045 steel, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 105, No. 1, 1311-1327, doi:10.1007/s00170-019-04325-6

282 Abbas, A. T.; Benyahia, F.; El Rayes, M. M.; Pruncu, C.; Taha, M. A.; Hegab, H. (2019). Towards optimization of machining performance and sustainability aspects when turning AISI 1045 steel under different cooling and lubrication strategies, Materials, Vol. 12, No. 18, Paper 3023, 17 pages, doi:10.3390/ma12183023

283 Jiang, Z.; Gao, D.; Lu, Y.; Liu, X. (2019). Optimization of cutting parameters for trade-off among carbon emissions, surface roughness, and processing time, Chinese Journal of Mechanical Engineering, Vol. 32, No. 1, Paper 94, 18 pages, doi:10.1186/s10033-019-0408-9

284 Equeter, L.; Devlamincq, R.; Ducobu, F.; Dutoit, C.; Dehombreux, P. (2020). Use of longitudinal roughness measurements as tool end-of-life indicator in AISI 1045 dry longitudinal turning, Materials Science Forum, Vol. 986, 93-101, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.986.93

285 Abidi, Y. (2020). Relationship between surface roughness and chip morphology when turning hardened steel, Production Engineering Archives, Vol. 26, No. 3, 92-98, doi:10.30657/ pea.2020.26.19

286 Paese, E.; Geier, M.; Rodrigues, F. R.; Mikolajczyk, T.; Mia, M. (2020). Assessment of CVD-and PVD-coated carbides and PVD-coated cermet inserts in the optimization of surface roughness in turning of AISI 1045 steel, Materials, Vol. 13, No. 22, Paper 5231, 26 pages, doi:10.3390/ma13225231

287 Vijaya Ganesa Velan, M.; Subha Shree, M.; Muthuswamy, P. (2021). Effect of cutting parameters and high-pressure coolant on forces, surface roughness and tool life in turning AISI 1045 steel, Materials Today: Proceedings, Vol. 43, Part 1, 482-489, doi:10.1016/j.matpr.2020.12.020

288 Abdulateef, O. F.; Taha, O. W. (2021). Surface roughness prediction in turning process by applying computer vision method, IIUM Engineering Journal, Vol. 22, No. 2, 249-260, doi:10.31436/ iiumej.v22i2.1507

289 Szczotkarz, N.; Maruda, R. W.; Dębowski, D.; Leksycki, K.; Wojciechowski, S.; Khanna, N.; Krylczyk, G. M. (2021). Formation of surface topography during turning of AISI 1045 steel considering the type of cutting edge coating, Advances in Science and Technology Research Journal, Vol. 15, No. 4, 253-266, doi:10.12913/22998624/141991

290 Vukelic, D.; Kanovic, Z.; Sokac, M.; Santosi, Z.; Budak, I.; Tadic, B. (2021). Modelling of microturning process based on constant cutting force, International Journal of Simulation Modelling, Vol. 20, No. 1, 146-157, doi:10.2507/IJSIMM20-1-553

291 Su, Y.; Li, C.; Zhao, G.; Li, C.; Zhao, G. (2021). Prediction models for specific energy consumption of machine tools and surface roughness based on cutting parameters and tool wear, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 235, No. 6-7, 1225-1234, doi:10.1177/0954405420971064

292 Kramar, D.; Cica, D. (2021). Modeling and optimization of finish diamond turning of spherical surfaces based on response surface methodology and cuckoo search algorithm, Advances in Production Engineering & Management, Vol. 16, No. 3, 326-334, doi:10.14743/apem2021.3.403

293 Ozdemir, M. (2020). Modelling and prediction of effect of machining parameters on surface roughness in turning operations, Tehnicki vjesnik – Technical Gazette, Vol. 27, No. 3, 751-760, doi:10.17559/tv-20190320104114

294 Sterpin Valic, G.; Cukor, G.; Jurkovic, Z.; Brezocnik, M. (2019). Multi-criteria optimization of turning of martensitic stainless steel for sustainability, International Journal of Simulation Modelling, Vol. 18, No. 4, 632-642, doi:10.2507/IJSIMM18(4)495

295 Saric, T.; Vukelic, D.; Simunovic, K.; Svalina, I.; Tadic, B.; Prica, M.; Simunovic, G. (2020). Modelling and prediction of surface roughness in CNC turning process using neural networks, Tehnicki vjesnik – Technical Gazette, Vol. 27, No. 6, 1923-1930, doi:10.17559/tv-20200818114207

296 Kang, W. T.; Derani, M. N.; Ratnam, M. M. (2020). Effect of vibration on surface roughness in finish turning: simulation study, International Journal of Simulation Modelling, Vol. 19, No. 4, 595-606, doi:10.2507/IJSIMM19-4-531

297 Jones, B.; Allen-Moyer, K.; Goos, P. (2020). A-optimal versus D-optimal design of screening experiments, Journal of Quality Technology, Vol. 53, No. 4, 369-382, doi:10.1080/ 00224065.2020.1757391

298 Johnson, N.S., et al.: Invited review: machine learning for materials developments in metals additive manufacturing. Addit. Manuf. 36, 101641 (2020). https://doi.org/10.1016/j.addma. 2020.101641

299 Jahan, A., Edwards, K. L., Bahraminasab, M.: Multi-criteria Decision Analysis for Supporting the Selection of Engineering Materials in Product Design, 2nd edn. Butterworth-Heinemann, Oxford (2016). https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100536-1.00013-8

300 Wojciechowski, S., Przestacki, D., Chwalczuk, T.: The evaluation of surface integrity during machining of inconel 718 with various laser assistance strategies. MATEC Web of Conf. 136, 01006 (2017)

301 Dobrotvorskiy, S., Balog, M., Basova, Y., Dobrovolska, L., Zinchenko, A.: Concept of the software for materials selection using .NET technologies. In: Tonkonogyi, V., et al. (eds.) InterPartner 2019. LNME, pp. 32–43. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_4

302 Rahim, A.A., Musa, S.N., Ramesh, S., Lim, M.K.: A systematic review on material selection methods. Proc. Inst. Mech. Eng., Part L: J. Mater. Des. Appl. 234(7), 1032–1059 (2020). https://doi.org/10.1177/1464420720916765

303 Trojanowski P.: Comparative analysis of the impact of road infrastructure development on road safety–a case study. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin 23–28, (2020). https://doi.org/10.17402/436

304 Jansen, J.: Root Cause Analysis: Success in Failure. Plastics Engineering, http://read.nxtbook.com/wiley/plasticsengineering/julyaugust2014/rootcauseanalysissuccessinfail.html. Accessed 10 Oct 2021

305 Wojciechowski, S., Twardowski, P.: Tool life and process dynamics in high speed ball end milling of hardened steel. Proc. CIRP 1, 289–294 (2012)

306 Ashby, M.: Materials Selection in Mechanical Design. 4th edn. Butterworth-Heinemann, Oxford. (2011). https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-663-7.00024-2

307 Callister, W.D., Jr., Rethwisch, D.G.: Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th edn. Wiley, USA (2018)

308 Djassemi, M.: A computer-aided approach to material selection and environmental auditing. J. Manuf. Technol. Manag. 23(6), 704–716 (2012). https://doi.org/10.1108/17410381211253290

309 Mahto, D., Kumar, A.: Application of root cause analysis in improvement of product quality and productivity. J. Ind. Eng. Manag. (JIEM) 1(2), 16–53 (2008). https://doi.org/10.3926/jiem.v1n2.p16-53

310 Doggett, A.M.: Root cause analysis: a framework for tool selection. Qual. Manag. J. 12(4), 34–45 (2005). https://doi.org/10.1080/10686967.2005.11919269

311 Dondapati, S., Trivedi, M., Dondapati, R.S., Chandra, D.: Investigation on the mechanical stresses in a muffler mounting bracket using root cause failure analysis (RCFA), finite element analysis and experimental validation. Eng. Fail. Anal. 81, 145–154 (2017). https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.08.010

312 Luo, T., Wu, C., Duan, L.: Fishbone diagram and risk matrix analysis method and its application in safety assessment of natural gas spherical tank. J. Clean. Prod. 174, 296–304 (2018). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.334

313 Kaš˘cak, J., et al.: Design of an atypical construction of equipment for additive manufacturing with a conceptual solution of a printhead intended for the use of

recycled plastic materials. Appl. Sci. 11, 2928 (2021). https://doi.org/10.3390/app11072928

314 Xu, Z., Dang, Y., Munro, P.: Knowledge-driven intelligent quality problem-solving system in the automotive industry. Adv. Eng. Inf. 38, 441–457 (2018). https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.08.013

315 Budnik, O.A., Sviderskii, V.A., Budnik, A.F., Berladir, K.V., Rudenko, P.V.: Composite material for chemical and petrochemical equipment friction assemblies. Chem. Pet. Eng. 52(1), 63–68 (2016)

316 Sharma, K.D., Srivastava, S.: Failure mode and effect analysis (FMEA) implementation: a literature review. J. Adv. Res. Aeronaut. Space Sci. 5(1&2), 1–17 (2018)

317 Petrescu, L., Cazacu, E., Petrescu, M.-C.: Failure mode and effect analysis in automotive industry: a case study. Sci. Bullet. Electric. Eng. Faculty 19(2), 10–15 (2019). https://doi.org/10.1515/sbeef-2019-0014

318 Mascia, A., et al.: A failure mode and effect analysis (FMEA)-based approach for risk assessment of scientific processes in non-regulated research laboratories. Accred. Qual. Assur. 25(5–6), 311–321 (2020). https://doi.org/10.1007/s00769-020-01441-9

319 Antosz, K., Pasko, L., Gola, A.: The use of artificial intelligence methods to assess the effectiveness of lean maintenance concept implementation in manufacturing enterprises. Appl. Sci. 10, 7922 (2020). https://doi.org/10.3390/app10217922

320 Rudenko, S., Berladir, K., Trojanowska, J., Varenyk, S., Shvetsov, D., Kravets, V.: Application of FMEA for assessment of the polymer composite materials quality. J. Eng. Sci. 8(2), B12–B18 (2021). https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(2).b3

321 Kazemzadeh, R.B., Behzadian, M., Aghdasi, M., et al.: Integration of marketing research techniques into house of quality and product family design. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 41, 1019 (2009). https://doi.org/10.1007/s00170-008-1533-2

322 Prasad, K., Maity, S.R., Chakraborty, S.: Quality function deployment-based expert system for materials selection. Int. J. Mater. Sci. Eng. 4(2), 80–93 (2016). https://doi.org/10.17706/ijmse.2016.4.2.80-93

323 Mayyas, A., et al.: Using quality function deployment and analytical hierarchy process for material selection of body-in-white. Mater. Des. 32(5), 2771–2782 (2011). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.001

324 Bhattacharyya, O., Chakraborty, S.: Q-analysis in materials selection. Decis. Sci. Lett. 4(1), 51–62 (2015). https://doi.org/10.5267/J.DSL.2014.9.001

325 Berladir, K., Gusak, O., Demianenko, M., Zajac, J., Ruban, A.: Functional properties of ptfe-composites produced by mechanical activation. In: Ivanov, V., et al. (eds.) DSMIE 2019. LNME, pp. 391–401. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_39

326 Jacyna, M., Semenov, I.N., Trojanowski, P.: The research directions of increase effectiveness of the functioning of the RSA with regard to specialized transport. Arch. Transp. 35(3), 27–39 (2015). https://doi.org/10.5604/08669546.1185181

327 Starzy´nska, B., et al.: Requirements elicitation of passengers with reduced mobility for the design of high quality, accessible and inclusive public transport services. Manag. Product. Eng. Rev. 6(3), 70–76 https://doi.org/10.1515/mper-2015-0028

328 Chernysh, Y., Balintova, M., Roi, I., Demcak, S.: Polymer materials: bibliographic data analysis and trend detection. Proc. Environ. Sci. Eng. Manag. 8, 555–563 (2021)

329 Matt, D.T., Modrák, V., Zsifkovits, H. (eds.): Industry 4.0 for SMEs. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4

330 Židek, K., Piteˇl, J., Adámek, M., Lazorík, P., Hošovský, A.: Digital twin of experimental smart manufacturing assembly system for industry 4.0 concept. Sustainability 12(9), 3658 (2020). https://doi.org/10.3390/su12093658

331 Phuyal, S., Bista, D., Bista, R.: Challenges, opportunities and future directions of smart manufacturing: a state of art review. Sustain. Futures (2020). https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100023

332 Zheng, P., et al.: Smart manufacturing systems for Industry 4.0: conceptual framework, scenarios, and future perspectives. Front. Mech. Eng. 13(2), 137–150 (2018). https://doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5

333 Židek, K., et al.: CNN training using 3D virtual models for assisted assembly with mixed reality and collaborative robots. Appl. Sci 11, 4269 (2021). https://doi.org/10.3390/app11094269

334 Varela, L., Putnik, G.D., Manupati, V., Rajyalakshmi, G., Trojanowska, J., Machado, J.: Collaborative manufacturing based on cloud, and on other i4.0 oriented principles and technologies: a systematic literature review and reflections. Manage. Prod. Eng. Rev. 9(3), 90–99 (2018). https://doi.org/10.24425/119538

335 7. Trojanowski, P.: Comparative analysis of the impact of road infrastructure development on road safety–a case study. Sci. J. Marit. Univ. Szczecin 23–28 (2020). https://doi.org/10.17402/436

336 Lazar, I., Husar, J.: Validation of the serviceability of the manufacturing system using simulation. J. Effi. Responsib. Educ. Sci. 5(4), 252–261 (2012). https://doi.org/10.7160/eriesj.2012.050407

337 Zheng, S.: Design of intelligent manufacturing product identification and detection system based on machine vision. In: Xu, Z., Parizi, R.M., Hammoudeh, M., Loyola-González, O. (eds.) CSIA 2020. AISC, vol. 1146, pp. 258–265. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-43306-2_37

338 Židek, K., Lazorík, P., Piteˇl, J., Pavlenko, I., Hošovský, A.: Automated training of convolutional networks by virtual 3d models for parts recognition in assembly process. In: Trojanowska, J., Ciszak, O., Machado, J.M., Pavlenko, I. (eds.) MANUFACTURING 2019. LNME, pp. 287–297. Springer, Cham (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-030-18715-6_24

339 Kopsacheilis, C., Charalampous, P., Kostavelis, J., Tzovaras, D.: In situ visual quality control in 3D printing. In: Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications – IVAPP, pp. 317–324 (2020). https://doi.org/10.5220/0009329803170324

340 Starzynska, B. , Szajkowska, K., Diering, M., Rocha, A., Reis, L.P.: A study of raters agreement in quality inspection with the participation of hearing disabled employees. In: Hamrol, A., Ciszak, O., Legutko, S., Jurczyk, M. (eds.) Advances in Manufacturing. LNME, pp. 881–888. Springer, Cham (2018). https://doi.org/10.1007/978-3-319-68619-6_85

341 KARPUS, V.E. et al. (2012) Intensification of Manufacturing Processes (Sumy: Sumy State University, doi: 10.13140/2.1.3953.7604 [in Ukrainian].

342 BI, Z.M. and ZHANG, W.J. (2001) Flexible Fixture Design and Automation: Review, Issues and Future Directions. International Journal of Production Research 39: 2867–2894, doi: 10.1080/00207540110054579.

343 KARPUS, V.E. and IVANOV V.A. (2012) Choice of the Optimal Configuration of Modular Reusable Fixtures. Russian Engineering Research 32(3): 213–219, doi: 10.3103/S1068798X12030124

344 NIXON, F. (1971) Managing to Achieve Quality and Reliability (Maidenhead: McGraw Hill).

345 RONG, Y. and ZHU, Y. (1991) Computer-Aided Fixture Design (New York, Marcel Dekker).

346 KUMBHAR, N. et al. (2012) Finite Element Modelling and Analysis of Workpiece – Fixture System. International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering 2(2): 60–65.

347 LIAO, Y. and Hu, S. (2001) An Integrated Model of a Fixture – Workpiece System for Surface Quality Prediction. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 17(11) 810–818, doi: 10.1007/s001700170108.

348 KANG, Y. et al. (2003) Computer-Aided Fixture Design Verification. Part 3. Stability Analysis. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 21(10) 842–849, doi: 10.1007/s00170-002-1401-4.

349 ASANTE, J. N. (2010) Effect of Fixture Compliance and Cutting Conditions on Workpiece Stability. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 48(1) 33–43, doi: 10.1007/s00170-009-2284-4.

350 CIOATA, V. and KISS, I. (2009) The Machining Error due to Contact Deformation of Workpiece – Fixture System. Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering 2(1) 33–36.

351 ZHENG, Y. (2005) Finite Element Analysis for Fixture Stiffness. PhD Thesis. (Worcester: Worcester Polytechnic Institute).

352 ASADA, H. and BY, A. (1985) Kinematic Analysis of Workpart Fixturing for Flexible Assembly with Automatically Reconfigurable Fixtures. IEEE Journal on Robotics and Automation 1(2) 86–94, doi: 10.1109/JRA.1985.1087007.

353 RONG, Y. and BAI, Y. (1997) Automated Generation of Fixture Configuration Design. Journal of Manufacturing Science and Engineering 119(2) 208–219, doi: 10.1115/1.2831097.

354 CHOU, Y.C. (1993) Automated Fixture Design for Concurrent Manufacturing Planning. Concurrent Engineering 1(4) 219–229, doi: 10.1177/1063293X9300100405.

355 WU, Y. et al. (1997) Automated Generation of Dedicated Fixture Design. International Journal Computer Application in Technologies 10(3–4) 213–235, doi: 10.1504/IJCAT.1997.062249.

356 TRAPPEY, A.J.C. et al. (1995) Computer-Aided Fixture Analysis Using Finite Element Analysis and Mathematical Optimization Modeling. Journal of Manufacturing Science and Engineering 2-1, 777–787.

357 DENG, H. (2006) Analysis and Synthesis of Fixturing Dynamic Stability in Machining Accounting for Material Removal Effect. Ph.D. Thesis. (Atlanta: Georgia Institute of Technology).

358 PAVLENKO, I.V. and IVANOV V.O. (2015) Ensuring of the Workpiece Stability Conditions in the Fixture with Locating Scheme on Three Planes. Bulletin of Sumy National Agrarian University 11(27) [in Ukrainian].

359 IVANOV, V. et al. (2017) Numerical Simulation of the System “Fixture – Workpiece” for Levers Machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 91(1) 79–90, doi: 10.1007/s00170-016-9701-2.

360 KARPUS, V.E. et al. (2012) Rapid-adjustable Locating Modules for Prismatic Parts. New Materials and Technologies in Metallurgy and Manufacturing 2, 91–94 [in Ukrainian].

361 Harisha, M.S.; Ramesh, D.K.; Jayalakshmi, N. A study on design modification and validation by static and dynamic load analysis of SAE-1020 and 40C8 grade steel connecting rods of 4-stroke petrol engine. In AIP Conference Proceedings; AIP Publishing LLC: Melville, NY, USA, 2021; Volume 2316, p. 030027.

362 Dulucheanu, C.; Severin, T.L.; Cerlinca, D.A.; Irimescu, L. Structures and mechanical properties of some dual-phase steels with low manganese content. Metals 2022, 12, 189.

363 Bakhoum, E.S.; Brown, D.C. An automated decision support system for sustainable selection of structural materials. Int. J. Sustain. Eng. 2015, 8, 80–92.

364 Kolesnyk, V.; Peterka, J.; Alekseev, O.; Neshta, A.; Xu, J.; Lysenko, B.; Sahul, M.; Martinovic, J.; Hrbal, J. Application of ANN for analysis of hole accuracy and drilling temperature when drilling CFRP/Ti alloy stacks. Materials 2022, 15, 1940.

365 Mafokwane, S.Z.; von Kallon, D.V. Material Selection of a Tri-adjustable Automated Heavy-duty Handling System Designed on Industry 4.0 Principles. In Proceedings of the 2nd South American Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IEOM 2021, São Paulo, Brazil, 5–8 April 2021; pp. 1606–1607

366 Ivchenko, O.; Ivanov, V.; Trojanowska, J.; Zhyhylii, D.; Ciszak, O.; Zaloha, O.; Pavlenko, I.; Hladyshev, D. Method for an effective selection of tools and cutting

conditions during precise turning of non alloy quality steel C45. Materials 2022, 15, 505.

367 Kazemzadeh Azad, S.; Akı¸s, T. Automated selection of optimal material for pressurized multi-layer composite tubes based on an evolutionary approach. Neural Comput. Appl. 2018, 29, 405–416.

368 Jghamou, A.; Lahbabi, S.; Riane, F. Automated Decisional Process for Material and Equipment Selection: Application to the Selection of Material for Water Pipes. In Proceedings of the 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IEOM 2021, Singapore, 7–11 May 2021; pp. 5872–5883.

369 Akhmedzyanov, D.A.; Kishalov, A.E.; Markina, K.V. Automated Selection of the Material a Fan Blade PS-90A. In Proceedings of the 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2016, Daejeon, Korea, 25–30 September 2016; p. 126186.

370 Srinivasan, S.; Kane, R.D.; Skogsberg, J.W. Automated material selection and equipment specification system for oil and gas production: Concept, development, implementation. NACE-Int. Corros. Conf. Ser. 2003, 2003, 135912.

371 Veldenz, L.; di Francesco, M.; Giddings, P.; Kim, B.C.; Potter, K. Material selection for automated dry fiber placement using the analytical hierarchy process. Adv. Manuf. Polym. Compos. Sci. 2018, 4, 83–96.

372 Panchuk, V.; Onysko, O.; Kotwica, K.; Barz, C.; Borushchak, L. Prediction of the accuracy of the tapered thread profile. J. Eng. Sci. 2021, 8, B1–B6.

373 Seo, S.; Tucker, S.; Newton, P. Automated material selection and environmental assessment in the context of 3D building modelling. J. Green Build. 2007, 2, 51–61.

374 Trehern, W.; Ortiz-Ayala, R.; Atli, K.C.; Arroyave, R.; Karaman, I. Data-driven shape memory alloy discovery using artificial intelligence materials selection (AIMS) framework. Acta Mater. 2022, 228, 117751.

375 Li, S.; Li, S.; Liu, D.; Zou, R.; Yang, Z. Hardness prediction of high entropy alloys with machine learning and material descriptors selection by improved genetic algorithm. Comput. Mater. Sci. 2022, 205, 111185.
376 Lai, C.-C.; Boyd, R.; Svensson, P.-O.; Höglund, C.; Robinson, L.; Birch, J.; Hall-Wilton, R. Effect of substrate roughness and material selection on the microstructure of sputtering deposited boron carbide thin films. Surf. Coat. Technol. 2022, 433, 128160.
377 Chatterjee, S.; Chakraborty, S. A multi-attributive ideal-real comparative analysis-based approach for piston material selection. OPSEARCH 2022, 59, 207–228.
378 Del Rosario, Z. Precision materials indices: Materials selection with statistically rigorous reliability analysis. AIAA J. 2022, 60, 578–586.
379 Kumar, D.; Marchi, M.; Alam, S.B.; Kavka, C.; Koutsawa, Y.; Rauchs, G.; Belouettar, S. Multi-criteria decision making under uncertainties in composite materials selection and design. Compos. Struct. 2022, 279, 114680.
380 Jahan, F.; Soni, M.; Parveen, A.; Waseem, M. Application of combined compromise solution method for material selection. In Proceedings of the International Conference on Advancement in Materials, Manufacturing and Energy Engineering, ICAMME 2021, Online, 18–20 February 2021; pp. 379–387.
381 Toledo, H.; Martínez-Gómez, J.; Nicolalde, J.F. Selection of rear axle tip alternative material of a car by multi-criteria means. Int. J. Math. Oper. Res. 2022, 21, 46–66.
382 Foong, F.M.; Thein, C.K.; Yurchenko, D. Structural optimisation through material selections for multi-cantilevered vibration electromagnetic energy harvesters. Mech. Syst. Signal Process. 2022, 162, 108044.
383 Izonin, I.; Tkachenko, R.; Gregus, M.; Zub, K.; Tkachenko, P. A GRNN-based approach towards prediction from small datasets in medical application. Proc. Comput. Sci. 2021, 184, 242–249.

384 Altun, O.; Zhang, D.; Siqueira, R.; Wolniak, P.; Mozgova, I.; Lachmayer, R. Identification of dynamic loads on structural component with artificial neural networks. Proc. Manuf. 2020, 52, 181–186.

385 Boyacı, A.Ç.; Tüzemen, M.Ç. Multi-criteria decision-making approaches for aircraft-material selection problem. Int. J. Mater. Prod. Technol. 2022, 64, 45–68.

386 Takemura, K. Escaping from Bad Decisions a Behavioral Decision-Theoretic Perspective; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2021.

387 Kwak, S.; Kim, J.; Ding, H.; Xu, X.; Chen, R.; Guo, J.; Fu, H. Using multiple regression analysis to predict directionally solidified TiAl mechanical property. J. Mater. Sci. Technol. 2022, 104, 285–291.

388 Kangishwar, S.; Radhika, N.; Sheik, A.A.; Chavali, A.; Hariharan, S. A comprehensive review on polymer matrix composites: Material selection, fabrication, and application. Polym. Bull. 2022, in press.

389 Sadowski, A.J.; Rotter, J.M.; Reinke, T.; Ummenhofer, T. Statistical analysis of the material properties of selected structural carbon steels. Struct. Saf. 2015, 53, 26–35.

390 Tian, P.; Zhu, G.; Kang, Y. Effect of Carbon content on microstructure, properties and texture of ultra-thin hot rolled strip produced by endless roll technology. Materials 2021, 14, 6174.

391 Salman, A.; Djavanroodi, F. Variability of chemical analysis of reinforcing bar produced in Saudi Arabia. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing: Bristol, UK, 2018; Volume 348, p. 012015.

392 Gandy, D. Carbon Steel Handbook; EPRI: Palo Alto, CA, USA, 2007.

393 Hosford, W.F. Iron and Steel; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2012.

394 Davis, J.R. Mechanical Properties of Carbon and Alloy Steels, 2nd ed.; ASM International: Russell Township, OH, USA, 1998.

395 Phelps, C. Carbon Steel: Microstructure, Mechanical Properties and Applications; Nova Science Publishers: Hauppauge, NY, USA, 2019

396 Islam, T.; Rashed, H.M.M.A. Classification and application of plain carbon steels. In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019.
397 Angelo, P.C.; Ravisankar, B. Introduction to Steels: Processing, Properties, and Applications, 1st ed.; Taylor & Francis Group: Abingdon, UK, 2019.
398 Lv, Z.; Qian, L.; Liu, S.; Zhan, L.; Qin, S. Preparation and mechanical behavior of ultra-high strength low-carbon steel. Materials 2020, 13, 459.
399 Johnson, O.T.; Ogunmuyiwa, E.N.; Ude, A.U.; Gwangwavac, N.; Addo-Tenkorang, R. Mechanical properties of heat-treated medium carbon steel in renewable and biodegradable oil. Proc. Manuf. 2019, 35, 229–235.
400 Kim, B.; Sietsma, J.; Santofimia, M.J. The role of silicon in carbon partitioning processes in martensite/austenite microstructures. Mater. Des. 2017, 127, 336–345.
401 Salvetr, P.; Nový, Z.; Gokhman, A.; Kotous, J.; Zmeko, J.; Motyˇcka, P.; Dlouhý, J. Influence of Si and Cu content on tempering and properties of 54SiCr6 steel. Manuf. Technol. 2020, 20, 516–520.
402 Kuˇcerová, L.; Jirková, H.; Volkmannová, J.; Vrtáˇcek, J. Effect of aluminium and manganese contents on the microstructure development of forged and annealed TRIP steel. Manuf. Technol. 2018, 18, 605–610.
403 Salvetr, P.; Gokhman, A.; Nový, Z.; Motyˇcka, P.; Kotous, J. Effect of 1.5 wt% Copper addition and various contents of silicon on mechanical properties of 1.7102 medium carbon steel. Materials 2021, 14, 5244.
404 Duriagina, Z.A.; Tkachenko, R.O.; Trostianchyn, A.M.; Lemishka, I.A.; Kovalchuk, A.M.; Kulyk, V.V.; Kovbasyuk, T.M. Determination of the best microstructure and titanium alloy powders properties using neural network. J. Achiev. Mater. Manuf. Eng. 2018, 87, 23–30.
405 Kusy, M.; Kowalski, P. Weighted probabilistic neural network. Inf. Sci. 2018, 430, 65–76.

406 Kumar, A.; Sharma, R.; Gupta, A.K. Experimental investigation of WEDM process through integrated desirability and machine learning technique on implant material. J. Mech. Behav. Mater. 2021, 30, 38–48.

407 Izonin, I.; Tkachenko, R.; Gregus, M.; Duriagina, Z.; Shakhovska, N. PNN-SVM approach of Ti-based powder's properties evaluation for biomedical implants production. CMC-Comput. Mater. Contin. 2022, 71, 5933–5947.

408 Xie, X.; Bennett, J.; Saha, S.; Lu, Y.; Cao, J.; Liu, W.K.; Gan, Z. Mechanistic data-driven prediction of as-built mechanical properties in metal additive manufacturing. Comput. Mater. 2021, 7, 86.

409 Gupta, B., Hoshi, T., Yoshizawa, H. (2022). High durability variable geometry turbine for commercial vehicle turbochargers. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2217(1), 012080. DOI: 10.1088/1742-6596/2217/1/012080

410 Chen, X., Koppe, B., Lange, M., Chu, W., Mailach, R. (2021). Rotating instabilities in a low-speed single compressor rotor row with varying blade tip clearance. Energies, Vol. 14(24). DOI: 10.3390/en14248369

411 Lee, T.-W., Hong, D.-K. (2022). Rotor design, analysis and experimental validation of a high-speed permanent magnet synchronous motor for electric turbocharger. IEEE Access, Vol. 10, pp. 21955-21969. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3152525

412 Aihara, A., Mendoza, V., Goude, A., Bernhoff, H. (2022). Comparison of three-dimensional numerical methods for modeling of strut effect on the performance of a vertical axis wind turbine. Energies, Vol. 15(7). DOI: 10.3390/en15072361

413 Michel, N., Wei, P., Kong, Z., Sinha, A. K., Lin, X. (2022). Modeling and validation of electric multirotor unmanned aerial vehicle system energy dynamics. ETransportation, Vol. 12, 100173. DOI: 10.1016/j.etran.2022.100173

414 Jia, Z., Yang, Y., Zheng, Q., Deng, W. (2022). Dynamic analysis of jeffcott rotor under uncertainty based on chebyshev convex method. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 167, 108603. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.108603

415 Li, C., Guo, X., Fu, J., Fu, W., Liu, Y., Chen, H., Wang, R, Li, Z. (2022). Design and analysis of a novel double-stator double-rotor motor drive system for in-wheel direct drive of electric vehicles. Machines, Vol. 10(1), 27. DOI: 10.3390/machines10010027

416 Dau, A.-T., Nistor, I., Gavrus, A. (2014). Numerical analysis concerning the harmfulness of crack turbine rotors using a multiscale approach based on a dynamic finite element method. Applied Mechanics and Materials, Vol. 656, pp. 315-324. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.656.315

417 Pei, D., Lian, T. (2013). Study on some nonlinear dynamics problems of rotor-sliding bearing system with impact-rubbing. Information Technology Journal, Vol. 12(17), pp. 4089-4094. DOI: 10.3923/itj.2013.4089.4094

418 Pavlenko, I., Simonovskyi, V. (2015). Computer program “Critical frequencies of the rotor”. Certificate of authorship No. 59855, Ukraine.

419 Pavlenko, I. (2007). Finite Element Method in Problems of Oscillations of Mechanical Systems. Sumy State University, Sumy, Ukraine.

420 Champ, C. A., Stefani, F. A., Silvestri, P., Massardo, A. F. (2022). Hysteresis and torsional-lateral vibration coupling in a complex shaft line supported by hydrodyanamic journal bearings. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 181, 109505. DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.109505

421 Kumar, A., Kumar, D., Masal, R. (2021). Coupling misalignment detection and condition monitoring of a rotor assembly using FEA-based reduced-order modeling methods. 6th National Symposium on Rotor Dynamics, NSRD 2019. Springer. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 445-458. DOI: 10.1007/978-981-15-5701-9_36

422 Simonovskyi, V. (2012). Theory of Linear Oscillations. Sumy State University, Sumy, Ukraine.

423 Verbovyi A., Khomenko V., Neamtu C., Pavlenko V., Simonovskiy V., Pavlenko I. (2022). Rotor Dynamics of Turbocompressor Based on the Finite

Element Analysis and Parameter Identification Approach. Journal of Engineering Sciences, Vol. 9(2), pp. D1-D5, doi: 10.21272/jes.2022.9(2).d1

424 Phuor, T., Yoon, G. (2022). Model order reduction for Campbell diagram analysis of shaft-disc-blade system in 3D finite elements. Structural Engineering and Mechanics, Vol. 81(4), pp. 411-428. DOI: 10.12989/sem.2022.81.4.411

425 Hadroug, N., Hafaifa, A., Alili, B., Iratni, A., Chen, X.: Fuzzy diagnostic strategy implementation for gas turbine vibrations faults detection: towards a characterization of symptom–fault correlations. J. Vib. Eng. Technol. (2021). https://doi.org/10.1007/s42417-021-00373-z

426 Qin, J., Gao, X., Yan, Q., Huang, W.-C., Yao, G.: High frequency modal test and dynamic performance evaluation of turbine rotor blades. In: 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2018, p. 143115 (2018)

427 Осипенко Д. В. Застосування комп’ютерних засобів для дослідження впливу жорсткісних характеристик підшипникових опор на вібраційний стан роторних машин : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 131 – прикладна механіка / наук. кер. І. В. Павленко. Суми : СумДУ, 2022. 43 с.

428 Yanez-Borjas, J.J., Camarena-Martinez, D., Vasquez-Barrera, M.A., Romero-Troncoso, R.J., Morinigo-Sotelo, D.: Experimental validation of the broken rotor bar fault evolution in linefed induction motors. In: 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing. ROPEC 2018, pp. 1–7 (2019). https://doi.org/10.1109/ROPEC.2018.8661426

429 Dimentberg, M.F.: Vibration of a rotating shaft with randomly varying internal damping. J. Sound Vib. 285, 759–765 (2005). https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.11.025

430 Simonovskiy, V., Pavlenko, I., Pitel, J., Stremoukhov, D., Ivanov, V.: Methods and algorithms for calculating nonlinear oscillations of rotor systems. In: Ivanov, V.,

Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds.) DSMIE 2021. LNME, pp. 63–74. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_7

431 Zou, M., Fang, P., Hou, Y., Peng, H.: Investigation on multiple-frequency synchronization experiment of vibration system with dual-rotor actuation. Mech. Syst. Signal Process. 164, 108261 (2022). https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108261

432 Kumar, M., Affijulla, S.: On-line estimation of alternators rotor angle dynamics in the modern power system. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 134, 107314 (2022). https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107314

433 Li, Z., Li, Z., Li, J., Feng, Z.: Leakage and rotordynamic characteristics for three types of annular gas seals operating in supercritical CO2 turbomachinery. J. Eng. Gas Turbines Power 143(10), 101002 (2021). https://doi.org/10.1115/1.4051104

434 Chao, D., Chakraborty, P., Nishikawa, T., Motter, A.E.: Hierarchical power flow control in smart grids: enhancing rotor angle and frequency stability with demand-side flexibility. IEEE Trans. Control Netw. Syst. 8(3), 1046–1058 (2021). https://doi.org/10.1109/TCNS.2021.3070665

435 Chelabi, M.A., Basova, Y., Hamidou, M.K., Dobrotvorskiy, S.: Analysis of the threedimensional accelerating flow in a mixed turbine rotor. J. Eng. Sci. 8(2), D1–D7 (2021). https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(2).d2

436 Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Stepanova, O.: Design calculation of automatic rotary motion electrohydraulic drive for technological equipment. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Perakovicr, D. (eds.) DSMIE 2021. LNME, pp. 133–142. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_14

437 Li, K., Peng, C., Deng, Z., Huang, W., Zhang, Z.: Field dynamic balancing for active magnetic bearings supporting rigid rotor shaft based on extended state observer. Mech. Syst. Signal Process. 158, 107801 (2021). https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107801

438 Filsoof, O.T., Yde, A., Bıttcher, P., Zhang, X.: On critical aeroelastic modes of a tri-rotor wind turbine. Int. J. Mech. Sci. 204, 106525 (2021). https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106525

439 Chen, X., Liu, J., Li, L.: Dynamics of the vibration system driven by three homodromy eccentric rotors using control synchronization. Appl. Sci. 11(16), 7691 (2021). https://doi.org/10.3390/app11167691

440 Yashchenko, A.S., Rudenko, A.A., Simonovskiy, V.I., Kozlov, O.M.: Effect of bearing housings on centrifugal pump rotor dynamics. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 233(1), 012054 (2017). https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012054

441 Shrestha, A., Gonzalez-Longatt, F.: Parametric sensitivity analysis of rotor angle stability indicators. Energies 14(16), 5023 (2021). https://doi.org/10.3390/en14165023

442 Li, Y., Luo, Z., Liu, J., Ma, H., Yang, D.: Dynamic modeling and stability analysis of a rotor-bearing system with bolted-disk joint. Mech. Syst. Signal Process. 158, 107778 (2021). https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107778 Rotor Dynamics and Stability of the Centrifugal Pump CPN 600-35 45

443 Krol, O., Porkuian, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters. Comptes Rendus de l’Acade’mie Bulgare des Sciences 72(11), 1546–1556 (2019). https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12

444 Jiang, L.: Finite element analysis and multi-objective optimization of flexible rotor-bearing system. Atomic Energy Sci. Technol. 55, 327–334 (2021). https://doi.org/10.7538/yzk.2021.zhuankan.0144

445 Li, Y., Tang, Z.: High-speep rolling bearing-dual rotor spindle system numerical simulation analysis of discrete modeling dynamics. J. Mech. Strength 43(4), 798–807 (2021). https://doi.org/10.16579/j.issn.1001.9669.2021.04.006

446 Zhang, W., Qin, P., Zhang, X., Ma, K., Yin, L., Li, C.: Rotordynamic characteristics of a novel pocket damper seal with self-regulated injection. J. Mech. Sci. Technol. 35(8), 3421–3434 (2021). https://doi.org/10.1007/s12206-021-0715-9

447 Liu, Z., He, Y.-Q., Gu, F., Yang, L.-Y., Han, J.-D.: Passivity-based control and flight experiment of quad-tilt rotor unmanned aerial vehicle. Control Theory Appl. 38(8), 1287–1298 (2021). https://doi.org/10.7641/CTA.2021.00346

448 Zhao, B.-S., Li, N., Ma, H., Han, H.-Z., Zhao, Z.-F.: Vibration characteristics of the helical gear rotor system considering mixed modification. J. Vib. Eng. 34(4), 704–711 (2021). https://doi.org/10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.04.006

449 Osadchiy, I., Kryvoruchko, D., Kolesnyk, V., Hatala, M., Duplak, J., Mital, D.: Development of integrated technology of FRP gear manufacturing. Manufact. Technol. 16(3), 574–578 (2016)

450 Volina, T., Pylypaka, S., Rebrii, A., Pavlenko, O., Kremets, Y.: Particle movement on concave coulter of the centrifugal distributor with radially installed vertical blades. In: Tonkonogyi, V., et al. (eds.) InterPartner 2020. LNME, pp. 237–246. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_24

451 Volina, T., Pylypaka, S., Nesvidomin, V., Pavlov, A., Dranovska, S.: The possibility to apply the Frenet trihedron and formulas for the complex movement of a point on a plane with the predefined plane displacement. Eastern-Eur. J. Enterp. Technol. 3(7(111)), 45–50 (2021). https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232446

452 Pylypaka, S., Volina, T., Nesvidomin, A., Zakharova, I., Rebrii, A.: Particle movement in a centrifugal device with vertical blades. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds.) DSMIE 2021. LNME, pp. 156–165. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_16

453 Saeed, N.A.-F., Mahrous, E., Nasr, E.A., Awrejcewicz, J.: Nonlinear dynamics and motion bifurcations of the rotor active magnetic bearings system with a new control scheme and rub-impact force. Symmetry 13(8), 1502 (2021). https://doi.org/10.3390/sym13081502

454 Berladir, K.V., Hovorun, T.P., Bilous, O.A., Baranova, S.V.: The modeling of the composition and properties of functional materials based on polytetrafluoroethylene. Funct. Mater. 25(2), 342–347 (2018). https://doi.org/10.15407/fm25.02.342

455 Tarelnyk, V., et al.: New sulphiding method for steel and cast iron parts. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 233(1), 012049 (2017). https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012049

456 Martsynkovskyy,V., Tarelnyk,V., Konoplianchenko,I., Gaponova,O., Dumanchuk,M.: Technology support for protecting contacting surfaces of half-coupling—shaft press joints against fretting wear. In: Ivanov, V., et al. (eds.) DSMIE 2019. LNME, pp. 216–225. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_22

457 Svirzhevskyi, K., Zabolotnyi, O., Tkachuk, A., Zablotskyi, V., Сагбпˇовб, D.: Methods of evaluating the wear resistance of the contact surfaces of rolling bearings. In: Tonkonogyi, V., et al. (eds.) InterPartner 2020. LNME, pp. 453–463. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_45

458 Kotliar, A., Gasanov, M., Basova, Y., Panamariova, O., Gubskyi, S.: Ensuring the reliability and performance criterias of crankshafts. Diagnostyka 20(1), 23–32 (2019). https://doi.org/10.29354/diag/99605

459 Martsynkovskyy, V.A., Pozovnyi, O.O.: The impact of the multi-gap seals on rotor dynamics. J. Eng. Sci. 4(1), C7–C12 (2017). https://doi.org/10.21272/jes.2017.4(1).c2

460 Simonovskiy, V.: Dynamics of Rotor Machines. Sumy State University, Sumy, Ukraine (2011)

461 Gadyaka, V., Leikykh, D., Simonovskiy, V.: Phenomena of stability loss of rotor rotation at tilting pad bearings. Procedia Eng. 39, 244–253 (2012). https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.031

462 Roy, D.K., Tiwari, R.: Estimation of the internal and external damping from the forward and backward spectrum of a rotor with a fatigue crack. Propuls. Power Res. 9(1), 62–74 (2020). https://doi.org/10.1016/j.jppr.2020.01.001

463 Vyngra A, Avdeyev B (2018) Calculation of the load of an electric drive of a reciprocating compressor of a ship refrigeration unit. In 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018;

Vladivostok, 3-4 October 2018, art. no. 8602830.
https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602830

464 Wei L, Wei H, Du H, Duan S (2018) Three-dimensional vibration of the crankshaft of a large marine diesel engine under a mixed thermo-elastic-hydro-dynamic lubrication coupling between flexible crankshaft and engine block. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 140(6):062802. https://doi.org/10.1115/1.4038457

465 Brusa E, Delprete C, Genta G (1997) Torsional vibration of crankshafts: Effects of non-constant moments of inertia. Journal of Sound and Vibration 205(2):135-150. https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.0964

466 Nisarg R, Paygude A, Vijay GS (2019) Influence of components with small inertia on the torsional vibrations of a crankshaft. International Journal of Scientific and Technology Research 8(10):809-812.

467 Liang M-X, Yuan H-Q, Zhao T-Y, Cai Y-Y (2014) Response of nonlinear bending-torsional coupling vibration of the combustion engine crankshaft system. Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University 35(3):402-405. https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3026.2014.03.022

468 Centea D, Rahnejat H, Menday MT (2001) Non-linear multi-body dynamic analysis for the study of clutch torsional vibrations (judder). Applied Mathematical Modelling 25(3):177-192. https://doi.org/10.1016/S0307-904X(00)00051-2

469 Vaz A, Sharma P, Atri R (2009) Modeling and simulation of the dynamics of crankshaft-connecting rod-piston-cylinder mechanism and a universal joint using the bond graph approach. In 14th National Conference on Machines and Mechanisms, NaCoMM 2009 1st ed. Durgapur, pp 298-303.

470 Fan J, Huo L (2020) Method of tolerance design and verification of parts based on follow-up crankshaft grinder with following double grinding wheel frame. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 772(1):012043. https://doi.org/10.1088/1757-899X/772/1/012043

471 Yashchenko AS, Rudenko AA, Simonovskiy VI, Kozlov OM (2017) Effect of bearing housings on centrifugal pump rotor dynamics. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 233(1):012054. https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012054

472 Martsynkovskyy V, Tarelnyk V, Konoplianchenko I, Gaponova O, Dumanchuk M (2019) Technology support for protecting contacting surfaces of half-coupling—Shaft press joints against fretting wear. In Advances in Design, Simulation and Manufacturing II, DSMIE 2019; Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham, pp 216-225. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_22

473 Singh J, Singh B (2001) Design of crankshaft for complete balancing of primary unbalanced force in reciprocating engine. Journal of the Institution of Engineers (India): Mechanical Engineering Division 82:138-142.

474 Gadyaka V, Leikykh D, Simonovskiy V (2012) Phenomena of stability loss of rotor rotation at tilting pad bearings. Procedia Engineering 39:244-253. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.031

475 Mourelatos ZP (1995) An analytical investigation of the crankshaft-flywheel bending vibrations for a v6 engine. In SAE Noise and Vibration Conference and Exposition; SAE Technical Papers; Traverse City, art. no. 951276. https://doi.org/10.4271/951276

476 Babak VP, Bilchuk YeYu, Shchepetov VV (2019) Increased wear coatings due intrastructural self-correction. Journal of Engineering Sciences 6(1):C11-C15. https://doi.org/10.21272/jes.2019.6(1).c3

477 Martsynkovskyy V, Kirik G, Tarelnyk V, Zharkov P, Konoplianchenko I, Dovzhyk M (2017) Definition of criteria for estimating alternative technologies of increasing quality of rotor shaft neck by electroerosive alloying and surface plastic deformation methods. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 233(1):012051. https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012051

478 Kumada Y (2001) Technological transition of crankshaft bearings in reciprocating engines. Toraibarojisuto. Journal of Japanese Society of Tribologists 46(11):849-854.

479 Shu GQ, Liang XY, Lu XC (2007) Axial vibration of high-speed automotive engine crankshaft. International Journal of Vehicle Design 45(4):542-554. https://doi.org/10.1504/IJVD.2007.014919

480 Belkhode PN (2019) Optimum choice of the front suspension of an automobile. Journal of Engineering Sciences 6(1):E21-E24. https://doi.org/10.21272/jes.2019.6(1).e4

481 Hauser BR, Blockus KM, Braly GW (2006) An improved method of accelerated crankshaft fatigue testing for reciprocating aircraft engines. In General Aviation Technology Conference and Exhibition; SAE Technical Papers; Wichita 2006-01-2421. https://doi.org/10.4271/2006-01-2421

482 Duan X, Hao Z (2006) Simulation of torsional vibration for an automotive diesel engine crankshaft. Nongye Jixie Xuebao. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery 37(7):42-44.

483 Rebrov O, Kozhushko A, Kalchenko B, Mamontov A, Zakovorotniy A, Kalinin E, Holovina E (2020) Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor. EUREKA: Physics and Engineering 4:90-100. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001352

484 Girtler J (2016) A model of fuel combustion process in the marine reciprocating engine work space taking into account load and wear of crankshaft-piston assembly and the theory of semi-markov processes. Polish Maritime Research 23(3):50-57. https://doi.org/10.1515/pomr-2016-0031

485 Zhao H, Xia C, Xiao Y, Li H, Xia T (2009) Bispectrum analysis for vibration data of crankshaft bearing in diesel engine. Zhendong Ceshi Yu Zhenduan. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis 29(1):14-18.

486 Busarov IS, Yusha VL, Busarov SS, Kobyl’skii RE (2020) Comparative evaluation of methods for calculating the dynamics of self-acting valves in

reciprocating compressor units. Chemical and Petroleum Engineering 56(7-8):664-672. https://doi.org/10.1007/s10556-020-00824-6

487 Yu BY, Feng QK, Yu XL (2011) Modal and vibration analysis of reciprocating compressor crankshaft system. In Institution of Mechanical Engineers - 7th International Conference on Compressors and their Systems; London, pp 295-303. https://doi.org/10.1533/9780857095350.6.295

488 Veerasamy V, Abdul Wahab NI, Ramachandran R, Kamel S, Othman ML, Hizam H, Farade R (2021) Power flow solution using a novel generalized linear hopfield network based on Moore–Penrose pseudoinverse. Neural Computing and Applications 33(18):11673-11689. https://doi.org/10.1007/s00521-021-05843-9

489 Izadi M, Sanyal AK, Warier RR (2019) Variational attitude and pose estimation using the Lagrange-d’ Alembert principle. 2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Miami, FL, USA, pp 1270-1275. https://doi.org/10.1109/CDC.2018.8619341

490 Kundera C, Marcinkowski WA (2010) The effect of annular seal parameters on the dynamics of a rotor system. International Journal of Applied Mechanics and Engineering 15(3):719-730.

491 Вербовий А. Є., Бурим М. С., Павленко І. В., Івченко О. В., Іванов В. О., Нєамцу К. Розроблення моделі універсального експериментального стенда для дослідження динаміки роторних систем // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма IX Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 19–22 квітня 2022 р.) / редкол. : О. Г. Гусак, І. В. Павленко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 245 с. - С. 93.

492 Кондусь В. Ю., Пузік Р. В., Бражнік Б. А., Павленко І. В. Розроблення енергоефективних вільновихрових насосів для забруднених рідин // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма IX Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 19–22 квітня 2022 р.) / редкол. : О. Г. Гусак, І. В. Павленко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 245 с. - С. 201-202.

493 Лопатеві насоси : навчальний посібник / В. Ю. Кондусь, О. І. Котенко . – Суми : Сумський державний університет, 2021. – 293 с. ISBN 978-966-657-860-3

494 Папченко А. А. Спеціальні гідромашини : навч. посіб. / А. А. Папченко, В. О. Панченко. – Суми : СумДУ, 2015. – 221 с.

495 Ковалев И. А. Теоретическое описание работы контрроторной лопастной системы центробежного насоса / И. А. Ковалев, А. В. Ратушный, Н. В. Семёнова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2016. – № 16 (1188). – С. 122–127.

496 Kulikov O., Ratushnyi O., Moloshnyi O., Ivchenko O., Pavlenko I. (2022). Impact of the closed, semi-opened, and combined contra-rotating stages on volume loss characteristics. Journal of Engineering Sciences, Vol. 9(1), pp. D6-D13, doi: 10.21272/jes.2022.9(1).d2

497 Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М. : Наука. гл. ред. физ.- мат. лит., 1987 – 840 с.

498 ANSYS CFX 13.0 SolverTheory. Release 13.0 [Электронный ресурс], 2010. – 261 р. – Режим доступа : http://www.ansys.com.

499 Sharapov S. Experimental Stand for Studying the Working Process in a Liquid-Vapor Jet Device with Replaceable Diffuser Parts / Sharapov S., Husiev D., Krmela J. // Journal of Engineering Sciences. – Sumy: Sumy State University, 2022. – Volume 9, Issue 1. – P. F21-F26

500 Milan N. Šarevski, Vasko N. Šarevski, Water (R718) Turbo Compressor and Ejector Refrigeration / Heat Pump Technology, Butterworth-Heinemann, 2016, 294 p. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100733-4.00010-X.

501 El-Dessouky H., Ettouney H., Alatiqi I., Al-Nuwaibit G. Evaluation of steam jet ejectors. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. Vol. 41, Issue 6, July 2002, Pages 551–561 https://doi.org/10.1016/S0255-2701(01)00176-3

502 Akteriana S. Improving the energy efficiency of traditional multi-stage steam-jet-ejector vacuum systems for deodorizing edible oils. Procedia Food Science. Vol. 1, 2011, P. 1785–1791 https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.262

503 Ahmadi, P., Fakhari, I., Rosen, M.A. A comprehensive approach for tri-objective optimization of a novel advanced energy system with gas turbine prime mover, ejector cooling system and multi-effect desalination. Energy. Vol. 2541, 2022 Article number 124352 https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124352

504 Bhowmick, A., Kundu, B. Extremum analysis based on exergy and economic principle for ejector-absorption cycles combined with regenerative organic-Rankine and gas-turbine cycles. Energy Conversion and Management. Vol. 2531, 2022. Article number 115174 https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115174

505 Woodland, B.J., Ziviani, D., Braun, J.E., Groll, E.A. Considerations on alternative organic Rankine Cycle congurations for low-grade waste heat recovery. Energy. Vol. 19315, 2020. Article number 116810 https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116810

506 Zheng L., Hu Y.;Mi Ch.;Deng J. Advanced exergy analysis of a CO2 two-phase ejector. Applied Thermal Engineering. Vol. 209, 2022. Article number 118247 https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118247

507 Assari M.R., Tabrizi, H. Basirat, Beik, A. Jafar Gholi, Shamesri K. Numerical study of water-air ejector using mixture and two-phase models. International Journal of Engineering. Vol. 35, Issue 2, 2022 https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.02b.06

508 Sharapov, S., Husiev, D., Panchenko, V., Kozin, V., & Baha, V. (2020). Analysis of the possibility of using R718 for a heat pump of a heating system based on a liquid-vapor ejector. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (8 (108), 39–44. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217274

509 Rahvard A. J., Lakzian E., Foroozesh F., Khoshnevis A. An applicable surface heating in a two-phase ejector refrigeration. European Physical Journal Plus. Vol. 137, Issue 2, 2022. Article number 179 https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02203-3

510 Арсеньєв В. М. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку : навчальний посібник / В. М. Арсеньєв, С. С. Мелейчук. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 364 с. http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/70532

511 Tsatsaronis, G. Application of Thermoeconomics to the Design and Synthesis of Energy Plants, article published in topic "Energy" in: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), developed under the Auspices of UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2006. https://www.academia.edu/28447922/Application_of_Exergoeconomic_and_Exergoenvironmental_Analysis_to_an_SOFC_System_with_an_Allothermal_Biomass_Gasifier

512 Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Дж. Тсатсаронис. – Одесса: ООО «Студия «Негоциант», 2002. – 152 с. http://catalog.odnb.odessa.ua/opac/index.php?url=/notices/index/IdNotice:21748/Source:default

513 Power Robert B. (1994). Steam Jet Ejectors for the Process Industries (McGraw-Hill Chemical Engineering) 498 URL: https://www.osti.gov/biblio/6770303-steam-jet-ejectors-process-industries-glossary-included

514 Bulinski, Z., Smolka, J., Fic, A., Banasiak, K., Nowak, A. (2010) A comparison of heterogenous and homogenous models of two-phase transonic compressible CO2 flow through a heat pump ejector. In: IOP Conference Series, Materials Science and Engineering, pp. 12–19 URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/10/1/012019/pdf

515 Kharazi, A. A., Muller, N. (2006). Comparing Water (R718) to Other Refrigerants. Process Industries, 85–93. doi: https://doi.org/10.1115/imece2006-13341

516 Milazzo A and Mazzelli F (2017). Future perspectives in ejector refrigeration, Applied Thermal Engineering, 121, 344–350 URL: https://www.academia.edu/47223092/Future_perspectives_in_ejector_refrigeration

517 Varga S, Lebre P S and Oliveira A C (2013). Readdressing working fluid selection with a view to designing a variable geometry ejector, Int. J. Low Carbon Technology, 0, 1-11 DOI: https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt026

518 Colarossi, M., Trask, N., Schmidt, D.P., Bergander, M.J. (2012). Multidimensional modeling of condensing two-phase ejector flow. Int. J. Refrig. 35(2), 290–299 URL: https://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1785&context=theses

519 Sharapov, S., Prokopov, M., Butrymowicz, D., Kozin, V. Efficiency of a Vacuum Cooling System with Liquid-Vapor Ejector for Biodiesel Production. – 10th International Conference on Compressors and Coolants, January 2021, Slovakia DOI: https://doi.org/10.18462/iir.compr.2021.0365

520 Sharapov S O, Arsenyev V M, Kozin V M Application of jet thermal compression for increasing the efficiency of vacuum systems. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 233 (2017) 012028 URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/233/1/012028

521 Sharapov S. Improving the efficiency of condensation installations of steam turbines by applying liquid-vapor ejector / Sharapov S., Yevtushenko S., Panchenko V., Kozin V., Ivchenko O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkiv: Technology Center, 2022. – Vol. 4, Issue 8. – P. 44-51

522 Tsatsaronis, J. Application of Thermoeconomics to the Design and Synthesis of Energy Plants, article published in topic "Energy" in: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), developed under the Auspices of UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2006 URL: https://www.academia.edu/28447922/Application_of_Exergoeconomic_and_Exergoenvironmental_Analysis_to_an_SOFC_System_with_an_Allothermal_Biomass_Gasifier

523 Арсеньєв В. М. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку : навчальний посібник / В. М. Арсеньєв, С. С. Мелейчук. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 364 с. URL: http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/70532

524 Kratos Defense & Security Solutions. https://www.kratosdefense.com/

525 Baykar Makina. https://baykartech.com/en/

526 KARGU Combat Proven Rotary Wing Loitering Munition System. https://www.stm.com.tr/en/kargu-autonomous-tactical-multi-rotor-attack-uav

527 Dovbysh A., Liubchak V., Shelehov I., Simonovskiy J., Tenytska A. Information-extreme machine learning of a cyber attack detection system. RADIOELECTRONIC AND COMPUTER SYSTEMS, Vol. 3, pp. 121-131, doi: 10.32620/reks.2022.3.09

528 БпАК – RAYBIRD 3. https://skyeton.com/raybird-3

529 Tang, L., Shao, G. Drone remote sensing for forestry research and practices. J. For. Res. 26, 791–797 (2015). https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y

530 Abu-Jbara, Khaled, et al. "A robust vision-based runway detection and tracking algorithm for automatic UAV landing." 2015 International conference on unmanned aircraft systems (ICUAS). IEEE, 2015.

531 Використання дронів у сільському господарстві. https://dronecenter.ua/review-of-the-dji-phantom-4-pro-quadcopter

532 Vayssade, Jehan-Antoine, Rémy Arquet, and Mathieu Bonneau. "Automatic activity tracking of goats using drone camera." Computers and Electronics in Agriculture 162 (2019): 767-772.

533 Quiroz, Ricardo A. Arango, Fernada Pereira Guidotti, and Albeiro Espinosa Bedoya. "A method for automatic identification of crop lines in drone images from a mango tree plantation using segmentation over YCrCb color space and Hough transform." 2019 XXII Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision (STSIVA). IEEE, 2019.

534 Kostyk K., Kuric I., Saga, M., Kostyk V., Ivanov V., Kovalev V., Pavlenko I. (2022). Impact of Magnetic-Pulse and Chemical-Thermal Treatment on Alloyed Steels' Surface Layer. Applied Sciences (Switzerland), Vol. 12(1), 2022, doi: 10.3390/app12010469

535 Ivchenko, O., Ivanov, V., Trojanowska, J., Zhyhylii, D., Ciszak, O., Zaloha, O., Pavlenko, I., Hladyshev, D. (2022). Method for an Effective Selection of Tools

and Cutting Conditions During Precise Turning of Non Alloy Quality Steel C45. Materials, Vol. 15(2), 505, doi: 10.3390/ma15020505

536 Berladir, K., Hatala, M., Hovorun, T., Pavlenko, I., Ivanov, V., Botko, F., Gusak, O. (2022). Impact of Nitrocarburizing on Hardening of Reciprocating Compressor's Valves. Coatings, Vol. 12(5), 574, doi: 10.3390/coatings12050574

537 Chelabi, M. A., Saga, M., Kuric, I., Basova, Y., Dobrotvorskiy, S., Ivanov, V., Pavlenko, I. (2022). The Effect of Blade Angle Deviation on Mixed Inflow Turbine Performances. Applied Sciences, Vol. 12(8), 3781, doi: 10.3390/app12083781

538 Loskutova T., Hatala M., Pogrebova I., Nikitina N., Bobina M., Radchenko S., Kharchenko N., Kotlyar S., Pavlenko I., Ivanov V. (2022). Composition, Structure, and Properties of Ti, Al, Cr, N, C Multilayer Coatings on AISI W1-7 Alloyed Tool Steel. Coatings, Vol. 12(5), 616, doi: 10.3390/coatings12050616

539 Ivanov, V., Botko F., Kolos, V., Pavlenko, I., Hatala M., Antosz, K., Trojanowska J. (2022). Locating Chart Choice Based on the Decision-Making Approach. Materials, Vol. 15(10), 3557, doi: 10.3390/ma15103557

540 Pavlenko, I., Pitel', J., Ivanov, V., Berladir, K., Mižáková, J., Kolos, V., Trojanowska, J. (2022). Using Regression Analysis for Automated Material Selection in Smart Manufacturing. Mathematics, Vol. 10(11), 1888, doi: 10.3390/math10111888

541 Ivanov V., Botko F., Dehtiarov I., Kočiško M., Evtuhov A., Pavlenko I., Trojanowska J. (2022). Development of Flexible Fixtures with Incomplete Locating: Connecting Rods Machining Case Study. Machines, Vol. 10(7), 493, doi: 10.3390/machines10070493

542 Pavlenko I., Kuric I., Basova Y., Saga M., Ivanov V., Kotliar A., Trojanowska J. (2021). Parameter Identification of a Disscrete-Mass Mathematical Model of Crankshaft Oscillations. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 44, 601, https://doi.org/10.1007/s40430-022-03902-3

543 Vukelic D., Prica M., Ivanov V., Jovicic G., Budak I., Luzanin, O. OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS BASED ON TURNING

PARAMETERS AND INSERT GEOMETRY. International Journal of Simulation Modelling. 2022. 21. С. 417-428. DOI: 10.2507/IJSIMM21-3-607

544 Berladir, K.; Zhyhylii, D.; Gaponova, O.; Krmela, J.; Krmelovб, V.; Artyukhov, A. Modeling of Polymer Composite Materials Chaotically Reinforced with Spherical and Cylindrical Inclusions. Polymers 2022, 14, 2087. https://doi.org/10.3390/polym14102087

545 Orgiyan A., Ivanov V., Tonkonogyi V., Balaniuk A., Kolesnik V. The Efficiency of Dynamic Vibration Dampers for Fine Finishing Boring. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. С. 140-149. DOI: 10.1007/978-3-031-16651-8_14

546 Orgiyan, A., Oborskyi, G., Ivanov, V., Balaniuk, A., Kolesnik, V. Improvement of the Efficiency of Fine Boring for Stepped Holes with a Large Diameter Range. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2022. С. 322-331. DOI: 10.1007/978-3-031-06025-0_32

547 Berladir K.V.; Hovorun T.P.; Rudenko S.G.; Bilous O.A.; Varenyk S.V.; Kravets V.V.; Shvetsov D.V. (2022). Mechanically Activated Polytetrafluoroethylene: Morphology and Supramolecular Structure. Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol. 14(1), 01030. DOI: 10.21272/jnep.14(1).01030

548 Andrusyshyn V., Luscinski S., Ivanov V., Pavlenko I. (2022). The efficiency of collaborative assembling cells. Journal of Engineering Siecnes, Vol. 9(1), pp. A9-A16. DOI: 10.21272/jes.2022.9(1).a2

549 Denysenko, Y. O., Pop, G. M., Sushko V. V., Korniienko, A. O., Husar I. (2022) Ensuring accurate characteristics of the pipe-piston installation. Journal of Engineering doi: 10.21272/jes.2022.9(2).b1 Sciences. Vol. 9, pp. B1-B6

550 ЗБІРНА ТОРЦЕВА ФРЕЗА : Патент України на корисну модель / О. В. Івченко, П. В. Кушніров, В. О. Панченко, С. С. Мелейчук, Д. О. Жигилій, В. О. Іванов, І. В. Павленко, А. В. Євтухов, Ю. О. Денисенко, О. В. Рясна, Ю. І. Шульга, В. С. Кулик, О. Л. Кайдик. - Україна. - № 150566, МПК B23C 5/06, заявл. 05.10.2021, опубл. 02.03.2022, бюл. № 9.

551 ЗАХОПЛЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ВИЛКИ : Патент України на корисну модель / Андрусишин Владислав Костянтинович (UA); Іванов Віталій Олександрович (UA); Павленко Іван Володимирович (UA); Куріц Іван (SK); Лущинські Славомір (PL). - Україна. - № 151785, МПК B25J 15/00, заявл. 21.12.2021, опубл. 15.09.2022, бюл. № 37.

552 ЗАХОПЛЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ШАТУНИ : Патент України на корисну модель / Андрусишин Владислав Костянтинович (UA); Іванов Віталій Олександрович (UA); Павленко Іван Володимирович (UA); Куріц Іван (SK); Івченко Олександр Володимирович (UA). - Україна. - № 151786, МПК B25J 15/00, заявл. 21.12.2021, опубл. 15.09.2022, бюл. № 37.

553 ГІДРОПНЕВМОМЕХАНІЧНИЙ АКУМУЛЯТОР : Патент України на корисну модель / Панченко Віталій Олександрович (UA); Івченко Олександр Володимирович (UA); Мелейчук Станіслав Станіславович (UA); Жигилій Дмитро Олексійович (UA); Іванов Віталій Олександрович (UA); Павленко Іван Володимирович (UA); Денисенко Юлія Олександрівна (UA); Кушніров Павло Васильович (UA); Рясна Ольга Василівна (UA); Корнієнко Андрій Олександрович (UA); Денисов Роман Володимирович (UA); Дудкіна Наталія Олександрівна (UA); Третяк Андрій Сергійович (UA); Ігнатьєв Олександр Савич (UA); Сисенко Валерій Валерійович (UA). - Україна. - № 152192, МПК F15B 1/04, заявл. 21.10.2021, опубл. 09.11.2022, бюл. № 45.

554 СТРУМИННА ВАКУУМНА СИСТЕМА З ВІДКРИТОЮ ГРАДИРНЕЮ: Патент України на корисну модель / Панченко Віталій Олександрович (UA); Шарапов Сергій Олегович (UA); Івченко Олександр Володимирович (UA); Арсеньєв Вячеслав Михайлович (UA); Жигилій Дмитро Олександрович (UA); Мелейчук Станіслав Станіславович (UA); Скиданенко Максим Сергійович (UA); Кушніров Павло Васильович (UA); Гусєв Данило Максимович (UA); Кулик Віталій Сергійович (UA); Денисов Роман Володимирович (UA); Гладишев Дмитро Петрович (UA); Рясна Ольга Василівна (UA). - Україна. - № 151780, МПК C11B 3/14, заявл. 10.12.2021, опубл. 14.09.2022, бюл. № 37.

555 АГРЕГАТНА ФРЕЗЕРНА ГОЛОВКА З РЕГУЛЬОВАНОЮ ШИРИНОЮ ОБРОБКИ: Патент України на корисну модель / Івченко Олександр Володимирович (UA); Кушніров Павло Васильович (UA); Денисенко Юлія Олександрівна (UA); Дегтярьов Іван Михайлович (UA); Євтухов Артем Віталійович (UA); Ступін Борис Анатолійович (UA); Панченко Віталій Олександрович (UA); Мелейчук Станіслав Станіславович (UA); Кулик Віталій Сергійович (UA); Денисов Роман Володимирович (UA); Рясна Ольга Василівна (UA); Динник Оксана Дмитрівна (UA); Фесенко Денис Ігорович (UA); Думенко Олександр Петрович (UA); Остапенко Богдан Андрійович (UA). - Україна. - № 151784, МПК B23C 3/00, заявл. 20.12.2021, опубл. 14.09.2022, бюл. № 37.

556 Іванов, В. О. Технологічні основи гнучких автоматизованих виробництв [Електронний ресурс] : навч. посіб. / В. О. Іванов, І. М. Дегтярьов. — Суми : СумДУ, 2022. — 203 с.

ДОДАТОК А

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ (ВИКОРИСТАННЯ) РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор СумДУ
_____ Сергій ЛЄОНОВ
«_____» _____ 2022 р.

АКТ
впровадження (використання) результатів
науково-дослідної роботи (етапу НДР) у навчальний процес

0121U112684, «Виконання завдання перспективного плану розвитку наукового напряму «Технічні науки» Сумського державного університету»
Етап 2 – виконання завдання у 2022 році:
2.1 Створення систем прийняття рішень під час технологічної підготовки виробництва для виготовлення деталей шляхом механічного оброблення;
2.2 Розроблення ефективних методів діагностування технічного стану енергетичних машин та забезпечення вібраційної надійності роторних систем;
2.3 Створення ефективних засобів машинного навчання автономної бортової системи БПЛА для розпізнавання наземних об'єктів;
яка виконана в період з липня 2022 р. по грудень 2022 р.

Створено науково-теоретичні основи впливу конструкцій гнучких верстатних пристроїв на динамічні характеристики процесів механічного оброблення деталей складної форми та розроблено інтегровану технологію підвищення якості виготовлення деталей за рахунок зменшення вібрацій, використання інтелектуальних систем прийняття рішень під час технологічної підготовки виробництва, а також систематизації впливу структури покриттів різального інструменту.
Розроблено математичну модель вимушених коливань роторів енергетичних машин із урахуванням нелінійної жорсткості опор, циркуляційних сил в ущільненнях, внутрішнього тертя та можливого контакту ротора зі статором, що дозволяє визначити шляхи підвищення вібраційної надійності енергетичних машин та довговічності їх функціональних елементів, у тому числі шляхом застосування ефективних методів діагностування технічного стану і прогнозування ресурсу та планового ремонту динамічно навантажених вузлів енергетичного устаткування.
Розроблено структурну схему і технічно реалізовано випробувально-налагоджу-вальний стенд для машинного навчання бортової системи автономного безпілотного літального апарату для розпізнавання наземних природних, інфраструктурних та мало-габаритбних статичних і динамічних об'єктів. Як складова частина стенду розроблено і програмно реалізовано симулятор 3D-макетів наземних об'єктів.

Керівник теми — Івченко Олександр Володимирович

Комісія в складі:

Голова комісії:	голова ради з якості факультету технічних систем і енергефективних технологій	Олександр ГУСАК
Члени комісії:	гарант освітньої програми, завідувач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів	Віталій ІВАНОВ
	гарант освітньої програми, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів	Артем ЄВТУХОВ

Встановила, що результати науково-дослідної роботи використовуються в навчальному процесі за освітніми програмами: «Технології машинобудування» спеціальності 131 «Прикладна

механіка» за першим (бакалаврським) та другим (магістерським) рівнями вищої освіти шляхом реалізації наступного:

1. Використання методів навчання заснованих на використанні науково-технічних розробок за патентами на корисні моделі, зокрема,

1) патенти «Збірна торцева фреза», «Спосіб дифузійної металізації твердих сплавів», «Агрегатна фрезерна головка з регульованою шириною обробки» - під час викладання дисципліни «Прогресивні технології виготовлення деталей насосного обладнання»;

2) патенти «Захоплювальний пристрій для деталей типу вилки», «Захоплювальний пристрій для деталей типу шатуни» - під час викладання дисципліни «Наукові основи складання машин»;

3) патенти «Гідропневмомеханічний акумулятор», «Струминна вакуумна система з відкритою градирнею» - під час викладання дисципліни «Технологічні основи гнучких автоматизованих виробництв».

2. 1. Результати досліджень були використані при курсовому проектуванні студентів і підготовці випускних кваліфікаційних робіт (Савченко Тарас Русланович, Хоменко Владислав Андрійович, Бурим Микола Олексійович, Амелін Михайло Миколайович, Малимоненко Давид Глібович, Сивоконь Вадим Володимирович), наукові керівники – виконавці НДР.

3. Отримані наукові результати та підготовлений звіт про НДР є частиною дисертаційних робіт виконавців НДР: аспірантів – Супруненко Микита Костянтинович, спеціальність 121; Вербовий Антон Євгенович, спеціальність 133; Колос Віталій Олександрович, спеціальність 132; Андрусишин Владислав Костянтинович, спеціальність 132.

Голова комісії:	_____	Олександр ГУСАК
Члени комісії:	_____	Віталій ІВАНОВ
	_____	Артем ЄВТУХОВ