

Міністерство освіти і науки України

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

ШИПУЛЬ ОЛЬГА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 621.785.044 : 533.27 : 519.876.5 (043.3)

НАУКОВІ ОСНОВИ ПРЕЦИЗІЙНОГО ТЕРМОІМПУЛЬСНОГО
ОБРОБЛЕННЯ ДЕТОНУВАЛЬНИМИ ГАЗОВИМИ СУМІШАМИ

05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Харків – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Планковський Сергій Ігорович,
Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, директор Навчально-наукового інституту енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Добротворський Сергій Семенович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів;
доктор технічних наук, професор
Саленко Олександр Федорович,
Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри конструювання машин;
доктор технічних наук, професор
Бісик Сергій Петрович,
Національний університет оборони України, начальник науково-випробувального відділу науково-дослідного центру випробувань, експертизи та сертифікації персональних броньованих засобів захисту.

Захист відбудеться «21» червня 2024 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.062.04 у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

Автореферат розісланий «14» травня 2024 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юрій СИСОЄВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Четверта індустріальна революція, так звана Індустрія 4.0, ініційована низкою соціально-економічних і технологічних факторів, зокрема гнучкістю, продуктивністю, короткими термінами підготовки виробництва, автоматизацією й цифровізацією процесів тощо. Високотехнологічні підприємства за стратегією Індустрії 4.0 будуються на повністю автоматизованих виробничих комплексах, які входять до складу кіберфізичних систем.

У той же час трендом наукомісткої техніки, наприклад, високоточних механізмів, є безперервне підвищення вимог до надійності й ресурсу, переважно за рахунок забезпечення промислової чистоти поверхонь і якості оброблення крайок. Технології фінішного очищення й опорядження крайок і поверхонь є одним із найважливіших елементів технологічних систем прецизійного виробництва, у тому числі для виробництва озброєнь, військової техніки, агрегатів літальних апаратів, для яких характерним є поєднання складної форми й високої точності деталей, використання високоміцних і спеціальних матеріалів і максимальних вимог до безвідмовності й ресурсу виробів.

На сьогодні сформувалася стала тенденція до випереджувального розвитку бездеформаційних методів фінішного опорядження, які, на відміну від традиційних лезвійних та абразивних методів, не призводять до вторинного забруднення поверхонь прецизійних деталей. Серед цих методів виділяють методи оброблення продуктами згоряння газових паливних сумішей, перевагою яких є можливість обробляти деталі довільної форми, у тому числі таких, що мають складні внутрішні порожнини, наприклад, корпусні деталі агрегатів військової й авіаційної техніки. Основною перепорою інтеграції до кола сучасного виробництва фінішних технологій, які реалізують термоенергетичні методи оброблення, є відсутність достовірних методів і методик автоматизованого призначення технологічних режимів оброблення, що мають точно враховувати закономірності стану складного об'єкта (або групи об'єктів) оброблення під дією ланцюга пов'язаних й взаємовпливових швидкоплинних процесів газодинамічної течії хімічно-реагуювальних газових сумішей, а визначення таких закономірностей, своєю чергою, є актуальною проблемою фізико-технічного оброблення.

Суттєвим недоліком наявного обладнання, що використовує термоенергетичний метод, є необхідність проведення численних експериментів для вибору налаштувань обладнання, розроблення технологічного оснащення та відсутність контрольованого переналагодження режимів оброблення, особливо для різних груп матеріалів. Зважаючи на велику кількість параметрів, що впливають на процеси фінішного оброблення детонувальними газовими сумішами, суто експериментальний підхід для встановлення робочих режимів не дозволяє забезпечити стабільну й прогнозовану якість оброблення. Комплексна автоматизація проектування технології й обладнання фінішного прецизійного оброблення продуктами згоряння газових сумішей на основі математичного моделювання процесів фізико-технічного оброблення матеріалів і науково обґрунтованих технічних рішень виконавчих систем обладнання є важливою науково-технічною проблемою, на вирішення якої сфокусована дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувались у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» за планами НДР університету. В основу підготовки й подання дисертації покладені матеріали досліджень, виконані авторкою в рамках реалізації держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України, у яких авторка брала участь у ролі відповідальної виконавиці: «Розробка та дослідження технологій фінішної обробки деталей аерокосмічної техніки інтенсивними тепловими потоками» (№ ДР 0113U001059); «Розробка автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонуючими газовими сумішами» (№ ДР 0117U002500); «Розробка технологій та технічних рішень для автоматизованих промислових установок прецизійної обробки деталей агрегатів ГТД детонуючими газовими сумішами» (№ ДР 0119U100943); «Розробка програмного та технічного забезпечення цифрових близнюків процесів обробки деталей літальних апаратів детонуючими газовими сумішами» (№ ДР 0121U109601).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є створення науково обґрунтованих методів, моделей, методик і нових технічних рішень, спрямованих на автоматизацію призначення режимів і обладнання для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання.

1. Розробити, дослідити й верифікувати комплекс математичних моделей, що описують робочі процеси систем термоімпульсного обладнання, урахувуючи вимоги до прецизійності їхньої роботи.

2. Розробити метод визначення розташування деталей під час термоімпульсного оброблення, який забезпечує умови для стабільної якості оброблення за рахунок найбільш рівномірного розподілу оброблювального середовища.

3. Розробити метод призначення режимів термоімпульсного зачищення крайок прецизійних деталей за кваліметричними показниками, урахувуючи міцнісні обмеження.

4. Запропонувати принципові технічні рішення для забезпечення науково обґрунтованих характеристик основних систем автоматизованого обладнання для прецизійної термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами.

5. Розробити технічне й програмне забезпечення побудови цифрових близнюків для керування та моніторингу роботи автоматизованого обладнання термоімпульсного оброблення газовими сумішами.

Об'єкт дослідження – системи автоматизованого проєктування технологічних процесів та обладнання термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами.

Предмет дослідження – математичні моделі технологічних і робочих процесів термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань і отримання основних результатів дисертаційної роботи застосовувалися класичні методи механіки деформованого твердого тіла й механіки руйнування, обчислювальної газодинаміки, включно з методами дослідження багатокомпонентних і багатофазних течій, у тому числі з рухомими границями; моделювання турбулентних течій

реагуювальних речовин з урахуванням стискуваності, теплообміну, фазових переходів, емпіричні методи дослідження газодинамічних процесів із плануванням факторного експерименту, методи аналітичної й обчислювальної геометрії та метод *phi*-функцій. Експериментальні дослідження газодинамічних процесів та процесів генерації самостабілізованої високовольтної імпульсної дуги та системи ініціювання детонації з плануванням факторного експерименту проведені на спеціально розробленому і виготовленому обладнанні. Як інструмент числових досліджень застосовувалися сучасні обчислювальні пакети на основі методу скінчених елементів та об'ємів.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі проведено комплекс прикладних досліджень, спрямованих на вирішення важливої науково-технічної проблеми – автоматизації прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами. Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному.

1. Уперше розроблено комплекс математичних моделей, що описують робочі процеси систем термоімпульсного обладнання, зважаючи на вимоги до прецизійності їхньої роботи, а саме генерації паливної суміші, ініціації горіння, згоряння паливної суміші, беручи до уваги теплообмін і випускання продуктів згоряння, який урахує особливості, притаманні робочим процесам систем термоімпульсного обладнання й охоплює комплекс цільових функцій, спрямованих на забезпечення прецизійності їхньої роботи.

2. Для розв'язання задачі просторового розташування деталей під час термоімпульсного оброблення вперше сформульовано задачу найбільш розрідженої балансної компоновки й розроблено метод її розв'язання, використовуючи апарат *phi*-функцій. Показано, що в разі оброблення одиничної деталі така задача може бути розв'язана суміщенням центрів ваги й головних центральних осей інерції тонких оболонок, які збігаються із зовнішньою поверхнею деталі та внутрішньою поверхнею робочої камери.

3. Отримав подальший розвиток метод еквівалентної камери щодо задач термоімпульсного оброблення деталей складної форми. На відміну від раніше відомих підходів показано, що для застосування методу необхідно забезпечити суміщення центрів ваги й головних центральних осей інерції тонких оболонок, що збігаються з поверхнями оригінальної й еквівалентної деталей, а розміри еквівалентної деталі визначати з умови зменшення головних центральних моментів інерції вказаних оболонок відносно головних центральних моментів інерції оригінальної деталі зі зворотно пропорційним відношенням їхніх площ.

4. Уперше розроблено метод призначення режимів термоімпульсного оброблення крайок на підставі сумісного розв'язання задач про визначення енергетичних характеристик устаткування й стану крайки під впливом питомого теплового потоку з відомою інтенсивністю, який дозволяє призначати технологічні параметри оброблення крайок за значеннями кваліметричного показника, урахувавши граничні величини питомого теплового потоку.

5. Уперше на основі числового моделювання встановлено міцнісні обмеження під час термоімпульсного оброблення деталей з литва й деталей після хіміко-термічного оброблення, що дозволило встановити обмеження з часу їхнього оброблення, виходячи з величини осередненого питомого теплового потоку.

Практичне значення отриманих результатів. Практичну цінність дисертаційної роботи становлять наступні основні результати.

1. Для забезпечення науково обґрунтованих вимог щодо точності дозування компонент паливної суміші на рівні 0,1% під час прецизійного термоімпульсного оброблення запропоновано використовувати спосіб генерації, за якого здійснюють одночасне подання компонентів через отвори із критичним перерізом. При цьому компоненти суміші подають із попередньо наповнених проміжних посудин регульованого об'єму із забезпеченням рівної температури газів у проміжних посудинах протягом витікання. Розроблено й виготовлено генератор паливної суміші, який реалізує запропонований спосіб.

2. Спроектовано й виготовлено систему ініціації керованого згоряння, яка містить блок високоенергетичного іскрового запалювання з регульованою енергією іскрового розряду й спеціальні свічки запалювання, завдяки яким ефективно реалізуються режими прямої ініціації детонації паливної суміші.

3. Удосконалено конструкцію клапана керованого випускання продуктів згоряння з робочої камери термоімпульсної установки. На відміну від раніше використовуваної конструкції, запропоновано здійснювати попереднє подання тиску на відкриття клапана з його утриманням електромагнітом. Це дозволяє досягти необхідних показників як за швидкістю спрацьовування (на рівні 0,01 с), так і за його стабільністю. Окрім цього, на вимогу забезпечити потрібний час оброблення деталі, для узгодження роботи систем ініціації згоряння й керованого випускання клапан обладнано засобами контролю положення (енкодерами).

4. Уперше для калібрування числових моделей розроблено й виготовлено модульний автономний автоматичний реєстратор експериментальних даних, який не потребує з'єднання із зовнішньою вимірювальною апаратурою. Пристрій розміщується безпосередньо в камері термоімпульсного обладнання, має на собі необхідну кількість датчиків, а також енергонезалежну систему зчитування, перетворення та зберігання інформації. Апаратне й програмне забезпечення реєстратора в поєднанні з розробленими числовими моделями робочих процесів термоімпульсного оброблення є базою для повної автоматизації проектування процесів фінішного оброблення детонувальними газовими сумішами з гарантованим рівнем якості деталей.

5. Уперше щодо автоматизації технології термоімпульсного оброблення, зокрема для визначення відповідних налаштувань обладнання й прогнозування параметрів якості оброблення, розроблено методику побудови цифрових близнюків на основі комбінації моделей зниженого порядку (ROM) робочих процесів оброблення й одновимірних моделей для стандартних елементів газового тракту, яка дозволяє із забезпеченням високої точності отримуваних результатів суттєво скоротити час їхнього визначення за рахунок використання моделей процесів зниженого порядку й використання стандартних елементів бібліотек Twin Builder та Modelica, які імітують роботу елементів керування (клапанів) й моніторингу (сенсорів). Розроблені моделі, алгоритми й технічні рішення для систем термоімпульсного обладнання й системи ЧПК дозволяють забезпечити встановлені вимоги щодо точності генерації суміші, часу оброблення й стабільності цих параметрів за циклічної роботи.

Результати дисертаційної роботи прийняті для впровадження у виробництво на ДП «ХМЗ «ФЕД». Створена науково-технічна база, яка використовується для виконання науково-дослідних робіт і підготовки фахівців в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» (ХАІ). Наукові здобутки, отримані під час виконання дисертаційної роботи, стали базою для діючої колаборації в наукових дослідженнях між ХАІ, Варшавським політехнічним університетом (Warsaw University of Technology, Poland) й Університетом Паннонії (Pannon Egyetem, Hungary).

Особистий внесок здобувача полягає в тому, що авторкою самостійно було створено новий інструментарій вирішення науково-технічної проблеми комплексної автоматизації обладнання фінішного прецизійного оброблення – наукові основи прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами, сформульовано мету й завдання дослідження, обґрунтовано загальну концепцію роботи, узагальнено результати дослідження, отримано нові наукові результати й положення, винесені на захист.

Роботи [2, 3], у яких на підставі аналізу стану прецизійного виробництва й сучасних методів фінішного оброблення сформульовано тенденції їхнього розвитку й обґрунтовано перспективність методів фінішного оброблення інтенсивними потоками енергії, у тому числі продуктами згоряння газових сумішей як таких, що мають унікальні переваги з погляду продуктивності й технологічних можливостей, виконано без співавторів.

У всіх роботах, виконаних у співавторстві, авторці належать формулювання мети досліджень, розроблення інструментарію дослідження, оброблення результатів, обговорення й формулювання висновків, і додатково: визначено пріоритетні напрямки й завдання досліджень щодо вдосконалення термоімпульсного обладнання, ураховуючи вимоги сучасного виробництва [1, 4]; розроблено математичні моделі нагрівання деталей та оплавлення задирок і облою під час термоімпульсного оброблення [5, 13, 14, 19, 27]; проведено аналіз особливостей сумішоутворення в камерах термоімпульсних машин і запропоновано технічні рішення щодо їхнього вдосконалення [6, 9]; розроблено методику розрахунку питомих теплових потоків під час термоімпульсного оброблення, у тому числі для камер з еквівалентною деталлю [7, 8, 10, 26]; розроблено методику вибору геометричних параметрів форкамери, яка забезпечує заданий ступінь рівномірності температур для термоімпульсного оброблення пластмас [12]; досліджено задачі оцінювання міцності деталей під час термоімпульсного оброблення та розроблено алгоритм призначення режимів термоімпульсного оброблення деталей, ураховуючи міцнісні обмеження [15, 16, 17, 18, 29, 33]; запропоновано методику призначення режимів термоімпульсного оброблення крайок, що ґрунтується на вимогах до якості крайки [20]; запропоновано концепцію реєстрації параметрів термоімпульсного оброблення за допомогою модульного автономного пристрою [21]; розроблено математичну модель генерації паливної суміші й методику побудови цифрового близнюка системи генерації газової суміші на базі комбінованих моделей й верифіковано на базі натурних експериментів [11, 22, 30]; уведено поняття найбільш розрідженої упаковки для задачі визначення просторового розташування деталей під час термоімпульсного оброблення, сформульовано відповідну математичну модель і проведено аналіз результатів

розрахунків [23, 24, 32]; розроблено математичну модель ініціації горіння під час термоімпульсного оброблення та проведено дослідження енергоефективності розробленої високоенергетичної системи іскрового запалювання [25, 31]; розроблено числову модель роботи системи керованого випускання продуктів згоряння термоімпульсного обладнання [28].

Апробація результатів дисертації. Основні положення, розділи й результати роботи викладено й обговорено на наукових семінарах кафедри технології виробництва літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях, зокрема на Всеукраїнській науково-технічній конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ'2017» (м. Харків, Україна, 2017 р.), VII Міжнародній конференції «Космічні технології: сучасне та майбутнє» (м. Дніпро, Україна, 2019 р.); XXIX Міжнародній конференції «Нові технології в машинобудуванні» (с. Коблеве, Україна, 2019 р.); XXIV Міжнародному конгресі двигунобудівників (с. Коблеве, Україна, 2019 р.); XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (м. Харків, Україна, 2019 р.); International Engineering Symposium at Bánki-2018 (м. Будапешт, Угорщина, 2018 р.); 9th Central European Symposium on Plasma Chemistry (CESPC9) joint with COST Action CA19110 Plasma Applications for Smart and Sustainable Agriculture (PlAgri) (Високі Татри, Словаччина, 2022 р.). Доповіді на міжнародних конференціях, *матеріали яких індексуються базою Scopus*: 3rd EAI International Conference on Computer Science and Engineering and Health Services COMPSE'2019 (м. Мехіко, Мексика, 2019 р.); International Scientific and Technical Conferences on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – Synergetic Engineering ICTM'2020, ICTM'2021, ICTM'2022 (м. Харків, Україна, 2020, 2021, 2022 pp.); 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange DSMIE'2020 (м. Харків, Україна, 2020 р.); 15th, 17th International Conferences on Mathematical Modeling and Simulation of Systems MODS'2020, MODS'2022 (м. Чернігів, Україна, 2020, 2022 pp.); International Conference on Advanced Mechanical and Power Engineering CAMPE'2021 (м. Харків, Україна, 2021 р.); International Conferences on Smart Technologies in Urban Engineering STUE'2022, STUE'2023 (м. Харків, Україна, 2022, 2023 pp.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 21 статті, у наукових виданнях, включених до *Переліку наукових фахових видань України*, 1 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 9 статтях у наукових періодичних виданнях, включених до категорії «А» *Переліку наукових фахових видань України*, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних *Web of Science Core Collection* та/або *Scopus*, із них 4 статті Q1/Q2, 4 статті Q3, 1 стаття Q4; 6 монографіях (розділах монографій), із них 2 проіндексовано в базі даних *Scopus*; отримано 2 патенти України на винахід і 4 патенти на корисну модель, а також подано в 17 матеріалах конференцій, із них 10 матеріалів проіндексовано в базі даних *Scopus*, 3 доповіді в Угорщині, Мексиці й Словаччині.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і додатки.

Повний обсяг дисертації становить 417 сторінок, у тому числі основного тексту

279 сторінок, 220 рисунків, 25 таблиць, список використаних джерел із 285 найменувань на 30 сторінках, 3 додатки на 21 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано актуальність теми дисертації, мету й основні завдання дослідження, наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами, відзначено особистий внесок здобувача в опублікованих роботах, наведено інформацію про апробацію й публікації результатів дисертації, структури і обсягу роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи на підставі огляду тенденцій розвитку прецизійного виробництва, установлення зв'язків промислової чистоти з чинниками якості прецизійних механізмів, критичного аналізу сучасних методів і технологій фінішного зачищення крайок й очищення поверхонь визначено перспективи прецизійного термоімпульсного оброблення.

Одним з основних трендів розвитку машинобудування є підвищення точності виготовлення деталей, який формувався під впливом великих наукових програм і прискорився з початком масового продукування виробів мікроелектроніки, механотроніки тощо. Із часом точність, колись досяжна лише в унікальних процесах, стала звичайною в технологіях масового виробництва. Паралельно відбувається процес мініатюризації високоточних механізмів. Мініатюризація й підвищення точності деталей призводять до істотного зменшення зазорів у прецизійних механізмах. Для виготовлення деталей високоточних механізмів найбільш перспективним є використання бездеформаційних технологій (лазерних, плазових, електрохімічних та ін.), які не призводять до викривлення розмірів за релаксації напружень у поверхневому шарі.

Причини сталого й динамічного розвитку прецизійного виробництва є вторинними наслідками впливу фундаментальних процесів природного, економічного й соціального характеру. Найбільшою мірою вимоги знизити вживання ресурсів можуть бути задовільнені за рахунок переходу до адитивних технологій – переходу від видалення матеріалу до його додавання.

Посилення вимог до безвідмовності й ресурсу прецизійних механізмів є однією з найважливіших тенденцій їхнього розвитку. Головним чинником їхнього забезпечення більшість авторів вважає чистоту робочих рідин від абразивних мікрочасток. Тому особливого значення для забезпечення безвідмовності прецизійних механізмів набуває вихідна чистота вхідних деталей, що забезпечують на етапі їхнього виробництва.

У процесі виробництва, транспортування й зберігання деталей на їхніх поверхнях неминуче утворюються забруднення. Найбільш небезпечними забрудненнями є фізичні забруднення – мікроліквіди, що утворюються під час розмірного оброблення, і частинки, що осідають на поверхні (рис. 1). Навіть у разі оброблення на найсучаснішому устаткуванні під час різання утворюються задирки на крайках й викривлення профілю крайки на перетині оброблюваних поверхонь.

Імплементація адитивних технологій у виробничі процеси не усуває проблем із промисловою чистотою.

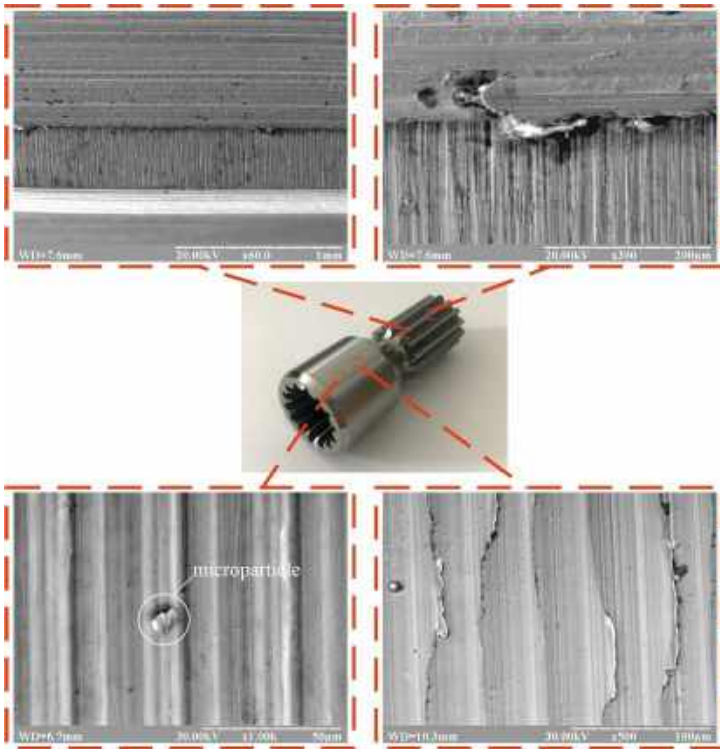


Рисунок 1 – Поверхневі пошкодження під час оброблення жароміцної сталі

Додатковою проблемою є наявність спеченого порошку у внутрішніх порожнинах й вузьких глухих каналах деталей. Очищення їх узагалі є серйозною проблемою. Крім того, неповне видалення мікрочастинок із поверхонь деталей порушує зчеплення покриттів, що неминуче призведе до його швидкого відшарування з порушенням функціональності деталей. Завдання видаляти задирки й облой є актуальними й під час оброблення термопластичних матеріалів. Наявність поверхневих нерівностей істотно впливає на механічні характеристики деталей. Цю проблему можна вирішити методами термічного полірування.

Створення стандартів, пов'язаних із якістю крайок, – ще

одне завдання, яке вирішується спільними зусиллями дослідників і промисловості. Проект міжнародного стандарту оброблення крайок передбачав сім рівнів якості фінішного оброблення крайок. Наступним кроком формування вимог до форми крайок стало введення стандарту щодо профілю різальної крайки. Згідно з ним форму поперечного профілю крайки задають кутом і додатковими 4 параметрами.

Стандарт установлює кількісні діапазони за розмірами й допусками для поперечного профілю зовнішніх і внутрішніх крайок та допуски на відхилення форми (табл. 1). Додатково стандарт містить цілу низку кваліметричних показників, які раніше не розглядалися, зокрема, вимоги до текстури й до поверхневого шару на крайках. Забезпечити вимоги якості крайок можливо лише за наявності необхідних метрологічних засобів.

Таблиця 1 – Допуски на відхилення форми зовнішніх крайок

Розмірні класи деталей, мм		Допуски прямолінійності й округлості величин, мм		
min	max	клас А	клас В	клас С
--	3	0.002	0.01	0.05
3	10	0.005	0.05	0.1
10	30	0.01	0.1	0.2
30	100	0.02	0.2	0.5
100	300	0.05	0.4	0.8

На сьогодні відомо більше 150 методів фінішного оброблення крайок. Більшість із цих методів є вузькоспеціалізованими. Тому актуальним завданням є розроблення універсальних методів, які можуть бути підґрунтям для комплексної автоматизації фінішного очищення й опорядкування крайок прецизійних деталей.

Такими методами можуть бути методи оброблення енергією від продуктів згоряння газових сумішей. Ці процеси є найбільш продуктивними за рахунок одночасного оброблення всіх поверхонь, оточених продуктами згоряння. Відомі кілька способів фінішного оброблення, що використовують енергію згоряння газових сумішей. Вони відрізняються основним механізмом видалення матеріалу й контролем процесу оброблення. Перший – термоенергетичний метод, за якого спалювання паливного газу відбувається в надлишковому кисні й задирки на деталях вигорають. Відведення відпрацьованих газів відбувається, коли їхня температура відповідає значенню процесу видалення. Зазвичай це забирає від 15 до 40 секунд і може призвести до перегрівання деталі й значного відкладення частинок оксидів металів на деталях після оброблення й вимагати повторного оброблення. Термоенергетичний метод має низку обмежень за оброблюваними матеріалами. Його практично не використовують для матеріалів на основі нікелю, хрому й кобальту (наприклад, жароміцних сплавів), оскільки ці матеріали погано реагують із киснем, також не рекомендовано обробляти сталеві деталі з твердістю більше 40 HRC, оскільки можлива поява поверхневих тріщин. Параметри термоенергетичного оброблення зазвичай призначають на підставі експериментальних досліджень.

Ключовою відмінністю другого, термоімпульсного, методу є контрольоване випускання продуктів згоряння. Оброблення зазвичай здійснюють паливними сумішами стехіометричного складу, а видалення задирок відбувається за рахунок розплавлення (рис. 2). Час контакту гарячих газів із заготовками зазвичай становить близько 1 с.

Випускання продуктів згоряння відбувається за температури, вищої за температуру конденсації парів металу. Це дозволяє уникнути необхідності травлення деталей після оброблення. Для термоімпульсного

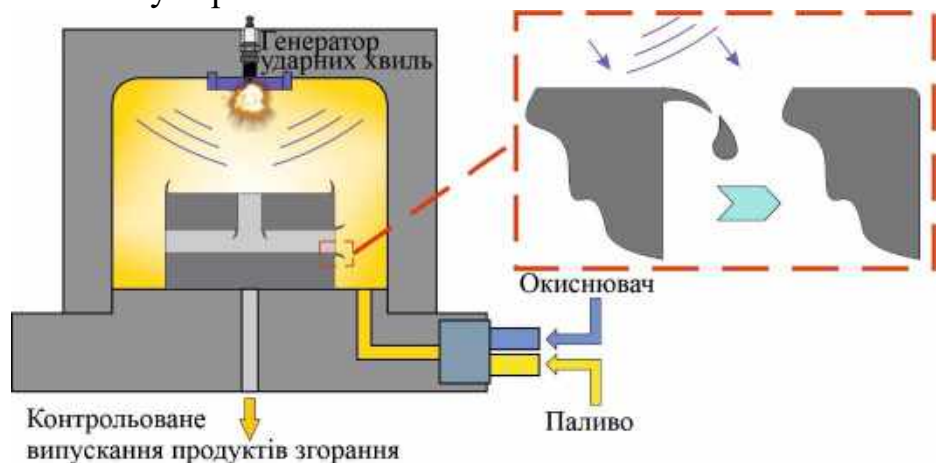


Рисунок 2 – Зачищення крайки термоімпульсним методом з ударними хвилями

оброблення час є додатковим керованим параметром процесу. Це робить процес більш гнучким і дозволяє обробляти деталі з матеріалів із низькою температурою плавлення, таких як термопласти. Для стабільної якості під час оброблення кількох деталей необхідно забезпечити максимально близькі значення питомих теплових потоків, що діють на поверхню оброблюваних деталей. Це є одним з головних завдань проєктування технологічних пристроїв. Таке завдання не розглядав жоден дослідник, який вивчав процеси, пов'язані з термоенергетичним обробленням.

Суттєвим недоліком наявного обладнання, що використовує й термоенергетичний, і термоімпульсний методи, є необхідність проведення численних експериментів для вибору налаштувань обладнання, розроблення технологічного оснащення й відсутність контрольованого переналадження режимів оброблення,

особливо для різних груп матеріалів. Зважаючи на велику кількість параметрів, що впливають на процеси фінішного оброблення детонувальними газовими сумішами, суто експериментальний підхід для встановлення робочих режимів не дозволяє забезпечити стабільну й прогнозовану якість оброблення. Комплексна автоматизація проєктування технології й обладнання фінішного прецизійного оброблення продуктами згоряння газових сумішей на підставі математичного моделювання процесів фізико-технічного оброблення матеріалів й науково обґрунтованих технічних рішень виконавчих систем обладнання є важливою науково-технічною проблемою, на вирішення якої сфокусовано дисертаційну роботу.

Таким чином, метою дисертаційної роботи є створення науково обґрунтованих методів, моделей, методик і нових технічних рішень, спрямованих на автоматизацію призначення режимів і обладнання для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами.

Основні наукові результати, наведені в першому розділі, опубліковано в працях автора [1, 2, 3, 4, 33, 36, 56].

Другий розділ роботи присвячено розробленню математичних моделей, які описують робочі процеси під час термоімпульсного оброблення, зокрема генерації паливної суміші, ініціації згоряння, горіння за різними режимами й керованого випускання продуктів згоряння.

Процеси генерації паливної суміші в термоімпульсному обладнанні мають такі особливості: наявність у робочій камері деталей складної форми, яскраво виражена неізотермічність процесу, високі вимоги до точності дозування компонентного складу, висока впливовість на результат ступеня гомогенності паливної суміші. Зазначені особливості враховано для побудови математичної моделі генерації паливної суміші. Змішування газів у камері й елементах газового тракту описує система тривимірних рівнянь однофазної багатокомпонентної течії, яка охоплює закони збереження маси, імпульсу і енергії в диференціальній формі. Для визначення теплофізичних властивостей плинного середовища, тобто залежностей густини, в'язкості, теплопровідності, питомої теплоємності, коефіцієнтів дифузії компонентів плинного середовища від тиску й температури використовують рівняння стану й експериментальні дані.

На етапі подання газів:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0;$$

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \operatorname{div} \mathbf{P};$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \mathbf{P} \operatorname{grad} \vec{u}; \quad \rho \frac{de}{dt} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \sum_{i=1}^N \vec{I}^i \vec{g} + \mathbf{P} \operatorname{grad} \vec{u}; \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial c^i}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{I}^i, \quad i = 1, \dots, N-1; \quad \rho \frac{\partial c^i}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{I}^i, \quad i = 1, \dots, N-1; \quad (4)$$

$$\vec{w}^i = -D^{iT} \operatorname{grad} c^i; \quad \vec{w}^i = -(D^i + D^{iT}) \operatorname{grad} c^i. \quad (5)$$

У рівняннях (1)–(5): $\rho(\rho^i)$, $p(p^i)$ – густина й тиск суміші та її i -тої компоненти; $\mathbf{P}$ – тензор напружки; c^i – масова концентрація i -тої компоненти суміші; e – внутрішня енергія газу; N – кількість компонент у суміші; $\vec{I}^i = \rho^i \vec{w}^i$ – вектор потоку дифузії;

D^i, D^{iT} – коефіцієнти молекулярної й турбулентної дифузії i -тої компоненти в суміші.

У рівнянні (3) останній доданок є доданком двох тензорів другого рангу за двома індексами: $\mathbf{P} \cdot \text{grad} \vec{u} = -p \text{div} \vec{u} + \mathbf{T} \cdot \text{grad} \vec{u}$, де $\mathbf{T}$ – тензор в'язкої напружності. Коефіцієнт молекулярної дифузії i -того компонента в суміші з N компонент може бути визначений за формулою:

$$D^i = \frac{1 - \chi^i}{\sum_{l=1, l \neq i}^N \frac{\chi^l}{D^{il}}},$$

де χ^i – молярна доля i -тої компоненти суміші; D^{il} – коефіцієнти бінарної дифузії i -тої компоненти в l -тій. Коефіцієнти бінарної дифузії можуть бути розраховані за відомими методиками або задані за даними експериментів.

У процесах перемішування газів під час подання їх у камеру чи елементи газового тракту основним чинником є швидкість газових струменів. Тому в рівняннях (2) і (3) можна нехтувати масовими силами, заданими членами $\sum_{i=1}^N \rho^i \vec{g}$ та $\sum_{i=1}^N \vec{l}^i \vec{g}$. Швидкість термо- й бародифузії в процесах перемішування газів в утворенні паливної суміші є значно меншою, ніж швидкість молекулярної й турбулентної дифузії, що дозволяє нехтувати цими процесами для запису рівняння (5). Швидкість молекулярної дифузії є зневажливо малою порівняно зі швидкістю механічного перемішування газу, тому процеси молекулярної дифузії можна вилучити з розгляду для моделювання наповнення робочої камери компонентами газової суміші і враховувати їх лише для етапу витримування паливної суміші в робочій камері.

Для обчислення густини, тиску, ентальпії й газової постійної суміші з N компонентами використовують правила змішування для ідеальних газів:

$$1/\rho = \sum_{i=1}^N c_i/\rho_i, p = \sum_{i=1}^N p_i, \mathcal{R} = \sum_{i=1}^N c_i \mathcal{R}_i, H = \sum_{i=1}^N c_i H_i. \quad (6)$$

Закон Фур'є для турбулентного теплового потоку:

$$\vec{q}_m = -\lambda_t \nabla T,$$

де коефіцієнт турбулентної теплопровідності визначає вираз

$$\lambda_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_T}, \quad (7)$$

а Pr_T – турбулентний аналог числа Прандтля.

Отримані за результатом осереднення за Рейнольдсом рівняння описують поведінку усереднених характеристик турбулентної течії, де за коефіцієнти в'язкості і теплопровідності беруть ефективні значення, що дорівнюють сумі ламінарної й турбулентної в'язкості й теплопровідності відповідно, тобто

$$\mu = \mu_l + \mu_t, \quad \lambda = \lambda_l + \lambda_t. \quad (8)$$

Для замикання системи визначальних рівнянь для моделювання генерації суміші використано SST-модель турбулентності як таку, що об'єднує дві найбільш застосовувані RANS-моделі – $k - \varepsilon$ та $k - \omega$ – і найточніше описує як розвинуті турбулентні течії, так і поблизу стінок.

Система рівнянь (1)–(8) повністю визначає характеристики багатокомпонентної газової суміші як у процесах перемішування під час подавання в робочу камеру чи елементи газового тракту, так і під час витримування після завершення подання газу. Виходячи зі специфічних вимог, пов'язаних з особливостями термоімпульсного

оброблення, до складу моделі введено такі критерії якості паливної суміші:

– точність забезпечення компонентного складу

$$\frac{M(c_n) = \int_V c_n dV}{\int_V dV} \in [c_n] \pm \delta(c_n); \quad (9)$$

– гомогенність паливної суміші

$$\sigma(c_n) = \sqrt{\frac{\int_V \left(c_n - \frac{\int_V c_n dV}{\int_V dV}\right)^2 dV}{\int_V dV}} \leq [\sigma(c_n)]; \quad (10)$$

– точність дозування заряду

$$G_{nc} = \int_V \rho dV \in [G_{nc}] \pm \delta(G_{nc}). \quad (11)$$

Проведено верифікацію математичної моделі на задачі перетікання газу між двома посудинами. Експериментальні дослідження проводилися на розробленому генераторі газової суміші автоматизованого термоімпульсного комплексу. Для розглянутих задач похибка результатів числових експериментів порівняно з натурними не перевищувала 0,5% (рис. 3).

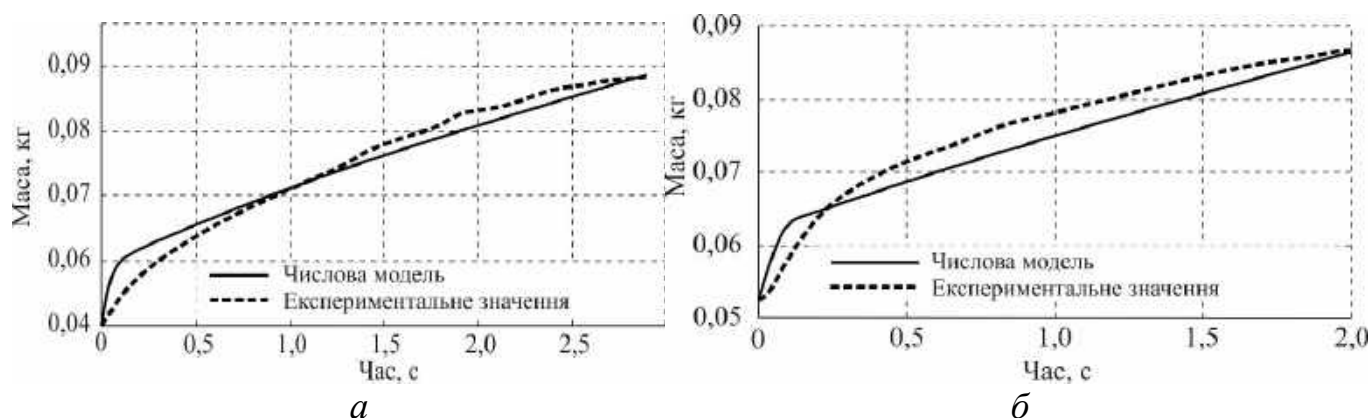


Рисунок 3 – Змінення маси газу в резервуарі під час наповнення витратою $G = 13,62$ г/с (а); $G = 11,29$ г/с (б)

Розроблено математичну модель ініціації горіння для подальшого визначення параметрів, які впливають на реалізацію того чи того режиму горіння паливної суміші. На відміну від традиційних підходів, у яких іскрове запалення моделюють точковим або об'ємним джерелом енергії заданої інтенсивності, у математичній моделі враховують процеси в розрядному колі. Це пов'язано з результатами досліджень К. Коритченка, у яких показано, що характер згоряння визначений не тільки енергією ініціації, але й способом її введення в іскровий канал. У зв'язку з цим побудована математична модель урахує нестационарне газодинамічне розширення іскрового каналу, нерівноважні хімічні процеси, іонізацію газу, радіаційний теплообмін і електронну теплопровідність, перехідність процесу в електричному розрядному колі. За розробленою моделлю (12)–(21) проведено комплекс числових досліджень уведення енергії в іскровому розряді залежно від довжини розрядного проміжку.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho u)}{\partial r} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial [r(p + \rho u^2)]}{\partial r} = \frac{p}{r}, \quad (13)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \left[r \left(u \left(\rho \varepsilon + \frac{\rho u^2}{2} + p \right) + k_T \frac{dT}{dr} \right) \right]}{\partial r} + \frac{\partial \left[\rho \varepsilon + \frac{\rho u^2}{2} \right]}{\partial t} = \sigma E^2 - W_{em}, \quad (14)$$

де ρ – густина газу; u – швидкість; p – тиск; ε – внутрішня енергія газу на одиницю маси; k_T – коефіцієнт теплопровідності; E – напруженість електричного поля в стовпі розрядного каналу; σ – електропровідність газу; W_{em} – питома потужність випромінювання; r – радіальна координата; t – час; T – температура газу.

Питому потужність випромінювання визначає вираз

$$W_{em} = \sigma_{SB} T^4 / l_R, \quad (15)$$

де σ_{SB} – стала Стефана-Больцмана; l_R – середнє значення вільного пробігу за Росселандом.

Коефіцієнт теплопровідності обчислюють за допомогою виразу

$$k_T = k_e + k_{rad} = 2,65 \frac{T^{2,5}}{\ln \Lambda} + 5,33 \sigma_{SB} T^3 l_R, \quad (16)$$

де k_e – коефіцієнт теплопровідності електрона; k_{rad} – коефіцієнт радіаційної теплопровідності; $\ln \Lambda$ – кулонівський логарифм.

Перехідний електричний процес обчислюють за рівнянням

$$L \frac{di}{dt} + [R_c + R_{sp}] \cdot i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = 0, \quad (17)$$

де C – ємність конденсатора; R_c – опір розрядного кола; L – індуктивність розрядного кола; R_{sp} – опір іскрового каналу; i – струм.

Опір R_{sp} визначає вираз

$$R_{sp} = l_{sp} / \int_0^Y 2\pi r \sigma dr, \quad (18)$$

де l_{sp} – довжина розрядного каналу; Y – максимальний радіус області моделювання; σ – електропровідність. Провідність визначає рівняння

$$\sigma = 2.82 \cdot 10^{-4} \frac{n_e}{n_N v \sigma_{tr} + n_e v \sigma_{cul}}, \quad (19)$$

де n_e – густина числа електронів; σ_{tr} – транспортний переріз пружних зіткнень електронів з нейтральними компонентами плазми; σ_{cul} – переріз кулонівського зіткнення; n_N – густина нейтральних компонентів; v – середня теплова швидкість електрона.

Густину нейтральних компонентів визначають рівняннями кінетики хімічних реакцій, у якій константу прямої швидкості k_f виражено у вигляді

$$k_f = A_f T^{n_f} \exp \left(\frac{-E_{af}}{RT} \right). \quad (20)$$

Тиск газу визначає вираз:

$$p = kT \sum n_c, \quad (21)$$

де k – стала Больцмана; n_c – густина всіх компонентів (e , N , N^+ , N^{++} , N_2).

За розробленою моделлю досліджено іскровий розряд у послідовній RLC-схемі

з різними параметрами схеми. Перша схема має такі параметри: коефіцієнт демпфування становив $\zeta = 0,38$, ємність $C = 0,2$ мкФ, індуктивність $L = 500$ мкГн, опір $R_c = 1,2$ Ω , напруга заряду $U_c = 3$ кВ. Друга схема має такі параметри: коефіцієнт демпфування становив $\zeta = 0,11$, ємність $C = 0,1$ мкФ, індуктивність $L = 2$ мкГн, опір $R_c = 1$ Ω , напруга заряду $U_c = 30$ кВ. Визначено, що вкладена енергія (рис. 4) збільшується за збільшення довжини проміжку з відхиленням від прямої пропорційності за рахунок впливу високого коефіцієнту демпфування. Установлено, що збільшення довжини розрядного проміжку призводить до зростання енергії, зменшення амплітуди розрядного струму й збільшення опору іскрового каналу.

Виявлені результати перебувають у задовільній кореляції з експериментальними даними інших авторів.

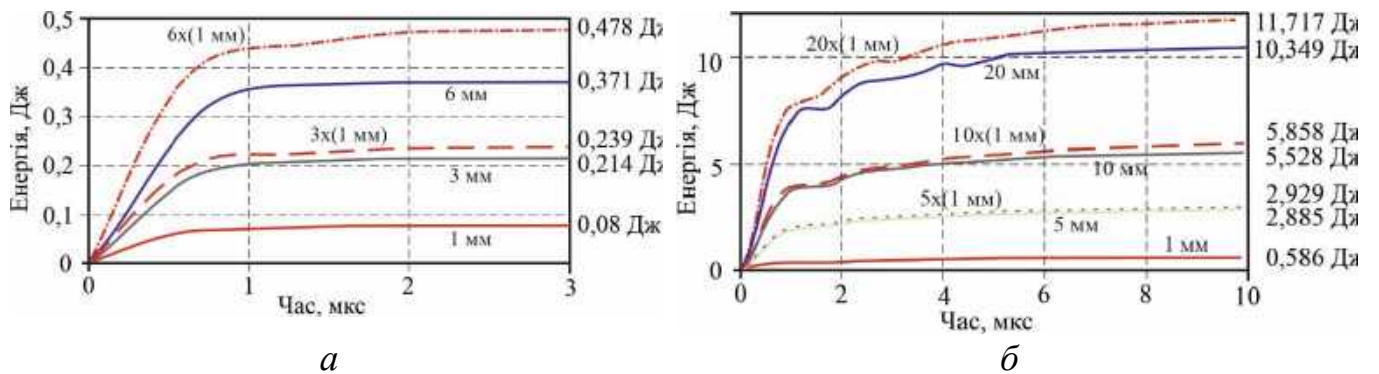


Рисунок 4 – Енергія, що вкладається в канал для першої (а) й другої (б) RLC-схем

Для забезпечення розрахункової сталості числової моделі було розроблено методику калібрування за параметром Парка.

У хімічних реакціях за участю х-ї моди швидкість реакції залежить від ефективної температури у вигляді:

$$k_k(T_{ef,x}) = A_k \cdot T_{ef}^{n_k} \exp \left[-\frac{E_{ak}}{kT_{ef,x}} \right], \quad (22)$$

при цьому

$$T_{ef,x} = T^s T_{v,x}^{1-s}, \quad (23)$$

де s – параметр моделі (параметр Парка); T – температура газу, яка відповідає кінетичній енергії молекул.

Для калібрування використано відомі експериментальні дані з дослідження критичної енергії для прямого ініціювання сферичних детонацій у стехіометричних сумішах високого тиску H_2-O_2 . Одержані результати наведено на рис. 5.

Для побудови математичної моделі горіння паливної суміші використовувалася модель кінцевої швидкості хімічних реакцій. При цьому початковий склад паливної суміші задавався результатом розв'язання задачі її генерації в камері після етапу витримання. Рівняння (1), (2), (24–30), (5–8), (31) формують математичну модель для опису процесів згорання паливної суміші й теплообміну для термоімпульсного оброблення.

$$\rho \frac{de}{dt} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + \sum_{i=1}^N Q^i - Q_{rad} + \mathbf{P} \cdot \text{grad} \mathbf{u}, \quad (24)$$

$$\rho \frac{\partial c^i}{\partial t} = -\text{div} \mathbf{\tilde{I}}^i + \dot{S}^i, \quad i = 1, \dots, N-1, \quad (25)$$

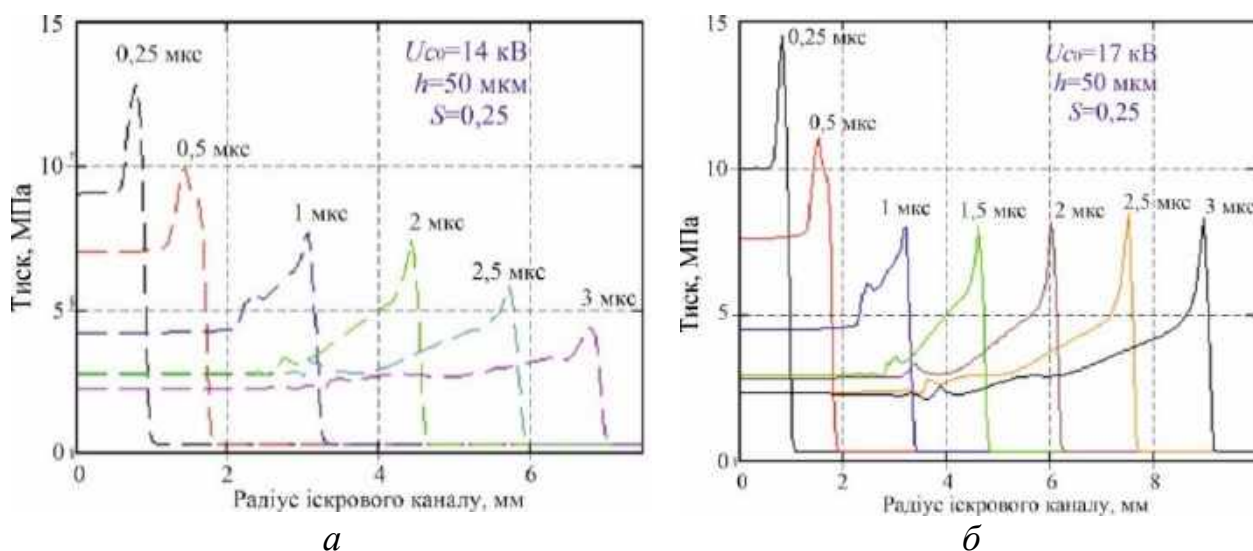


Рисунок 5 – Розподіл тиску за радіусом іскрового каналу: детонація не ініційована (а), детонація ініційована (б)

де Q^i – виділення (поглинання) тепла за всіма реакціями з утворенням i -тої компоненти; Q_{rad} – об'ємне випромінювання газу (зважаючи на швидкоплинність процесів, під час оброблення металевих деталей ним можна знехтувати); S^i – масова швидкість утворення i -тої компоненти суміші.

Масова швидкість утворення i -тої компоненти може бути визначена підсумовуванням за усіма K реакціями, у яких вона бере участь:

$$\dot{S}^i = M_i \sum_{r=1}^K \dot{S}_{i,r}, \quad (26)$$

де M_i – молярна маса i -тої компоненти, а $\dot{S}_{i,r}$ – швидкість утворення/знищення i -тої компоненти в реакції r .

Величину $\dot{S}_{i,r}$ задають формулювання моделі кінцевої швидкості хімічних реакцій. У загальному випадку ця модель допускає, що швидкість елементарної реакції може бути негативною, якщо визначена зворотна реакція. Тому величину $\dot{S}_{i,r}$ обчислюють як:

$$\dot{S}_{i,r} = \Gamma(v''_{i,r} - v'_{i,r}) \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{v''_{j,r}} \right), \quad (27)$$

де $[C_{j,r}]$ – молярна концентрація j -тої компоненти в реакції r ; $k_{f,r}$, $k_{b,r}$ – константи швидкості для прямої і зворотної реакції r відповідно; $v'_{i,r}$ – стехіометричний коефіцієнт для реагенту i в реакції r ; $v''_{i,r}$ – стехіометричний коефіцієнт для продукту i в реакції r ; Γ – коефіцієнт, що враховує вплив третіх тіл на швидкість реакції.

Для визначення констант прямих і зворотних реакцій використовують температурні залежності Ареніуса:

$$k_{f,r} = A_{r1} T^{\beta_{r1}} \exp\left(-\frac{E_r}{RT}\right), \quad (28)$$

$$k_{b,r} = A_{r2} T^{\beta_{r2}} \exp\left(-\frac{E_r}{RT}\right), \quad (29)$$

де A_r, β_r – емпіричні коефіцієнти; E_r – енергія активації реакції r .

Величина виділення / поглинання тепла Q^i для i -тої компоненти обчислюється:

$$Q^i = \frac{h_i^0 \dot{S}^i}{M_i}, \quad (30)$$

де h_i^0 – ентальпія утворення i -тої компоненти.

Для визначення профілю температури в пристінковому шарі використовувався аналітичний розв'язок, здобутий Кадером, що дозволило отримати вираз для розрахунку питомих теплових потоків у вигляді:

$$q_w = \frac{\rho c_p [(\tilde{u}_\tau^{\text{ввз}})^4 + (\tilde{u}_\tau^{\text{log}})^4]^{0,25}}{Pr \cdot \tilde{y}^+ \exp(-\Gamma) + [2.12 \ln(1 + \tilde{y}^+) + \beta] \exp(\frac{-1}{\Gamma})_{w_f}}. \quad (31)$$

До розробленої моделі введено критерії, з урахуванням яких сформульовано висновок про відповідність розрахованого режиму заданим умовам, зокрема:

– точність забезпечення осередненого за зовнішньою та внутрішньою поверхнями оброблюваної деталі й часом оброблення питомого теплового потоку

$$\left. \begin{aligned} M_3(\bar{q}_\tau) &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left(\frac{\int_{S_3} q dS}{S_3} \right) dt \in [\bar{q}] \pm \delta(\bar{q}) \\ M_B(\bar{q}_\tau) &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left(\frac{\int_{S_B} q dS}{S_B} \right) dt \in [\bar{q}] \pm \delta(\bar{q}) \end{aligned} \right\}, \quad (32)$$

– рівномірність розподілу питомого теплового потоку на зовнішній і внутрішній поверхнях оброблюваної деталі

$$\left. \begin{aligned} \sigma(q_3) &= \sqrt{\frac{\int_{S_3} \left(q - \frac{\int_{S_3} q dS}{S_3} \right)^2 dS}{S_3}} \leq [\sigma(q)] \\ \sigma(q_B) &= \sqrt{\frac{\int_{S_B} \left(q - \frac{\int_{S_B} q dS}{S_B} \right)^2 dS}{S_B}} \leq [\sigma(q)] \end{aligned} \right\}, \quad (33)$$

де τ – час оброблення, а індекси «з» та «в» позначають параметри на зовнішній і внутрішній поверхнях оброблюваної деталі відповідно.

Граничними умовами на етапі згорання паливної суміші є:

$$\vec{u} = 0, \quad T = T_0, \quad (x, y, z) \in \partial\Omega_\kappa \vee \partial\Omega_\partial, \quad (34)$$

де $\partial\Omega_\kappa$, $\partial\Omega_\partial$ – внутрішня поверхня камери й поверхня оброблюваних деталей відповідно.

Як початкові умови в області ініціації згорання використано характеристики, розраховані на момент t_3 закінчення запалення для процесу ініціації горіння суміші, у решті об'єму камери – на момент закінчення витримування t_g для процесу генерації суміші.

Проведено комплексну верифікацію розробленої математичної моделі для задач переходу горіння в детонацію й теплообміну в умовах затухання ударних хвиль. Зокрема було порівняно результати числового моделювання теплообміну на різних режимах згорання з даними натурних експериментів лабораторії Університету Пуатьє (рис. 6). Розбіжність результатів становить від 0,5% до 6 %, що вкладається в межі точності вимірювань досліджуваних параметрів.

На підставі розробленої моделі запропоновано метод прискореного визначення

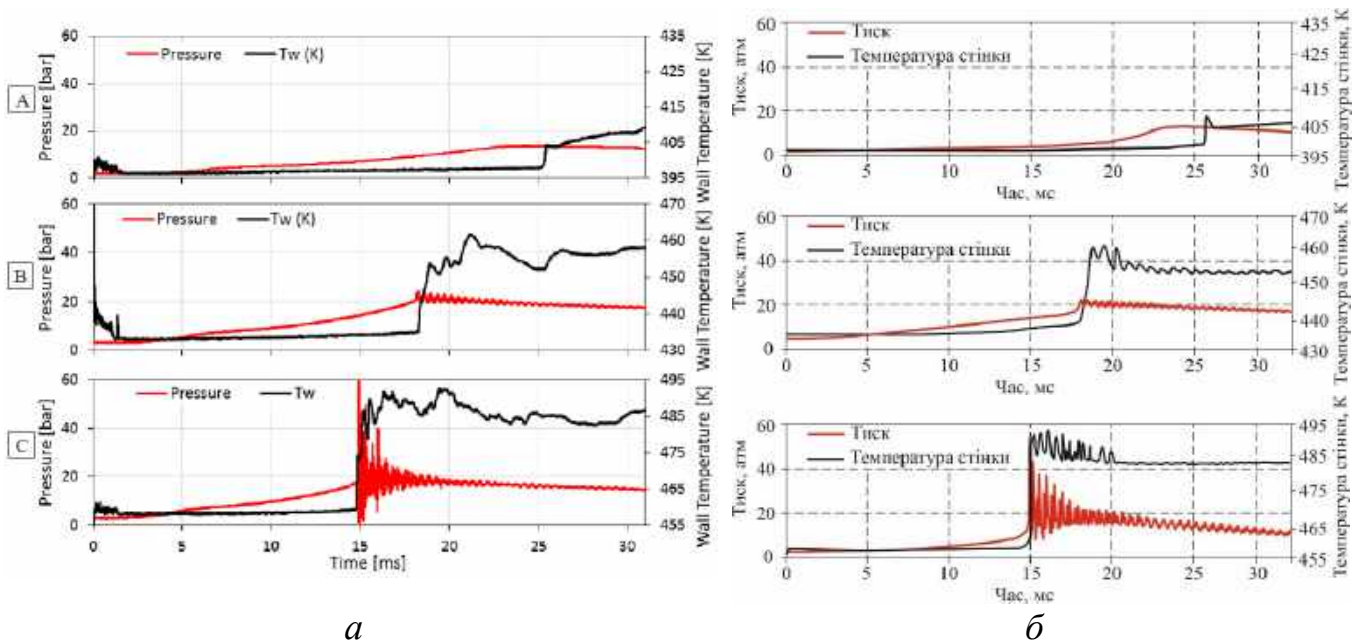
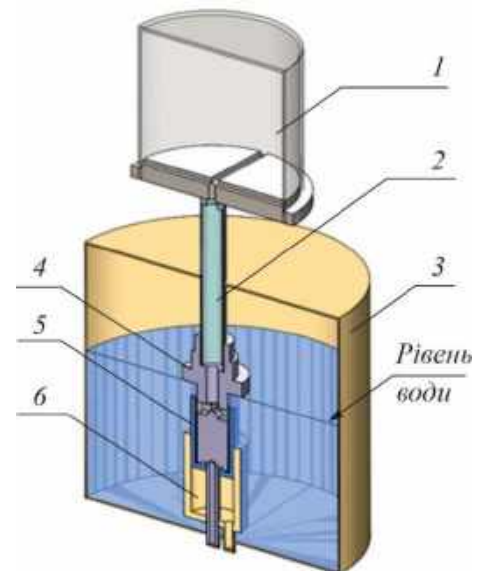


Рисунок 6 – Розподіл тиску й температури стінки під час згорання суміші на різних режимах (А: дефлаграція; В: самозаймання; С: детонація), які отримано в натурних (а) і числових (б) експериментах

питомих теплових потоків із використанням еквівалентної камери. Його сутність полягає в тому, що для визначення осереднених питомих теплових потоків і часу дії ударних хвиль для випадку оброблення деталі складної форми використовують результати розрахунку для випадку еквівалентної деталі простої форми. Оцінено вплив похибок компонентного складу суміші на величину питомих теплових потоків. Установлено, що точність дозування компонентного складу суміші має бути в 8 разів вищою, ніж задана точність питомого теплового потоку.

Створено математичну модель випускання продуктів згорання. У термоімпульсному обладнанні кероване випускання продуктів згорання здійснюють через пневматичний клапан, частково занурений у воду (рис. 7). Модель містить систему диференціальних рівнянь двофазної течії з рухомими границями. Особливістю моделі є використання експериментальних даних для визначення сили тертя на рухомих елементах. Відстеження межі розділу фаз здійснюється за рівнянням нерозривності для об'ємної частки. Для фази n це рівняння має вигляд:

$$\frac{1}{\rho_n} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_n \rho_n) + \nabla (\alpha_n \rho_n \vec{v}_n) \right) = S_{\alpha_n} + \sum_{p=1}^N (\dot{m}_{pn} - \dot{m}_{np}), \quad (35)$$



1 – робоча камера; 2 – магістраль;
3 – резервуар із водою;
4 – випускний клапан;
5 – поршень; 6 – камера подавання керовального тиску
Рисунок 7 – Положення клапана випускання продуктів згорання

де $\dot{m}_{np}$ – передавання маси від фази n до фази p ; $\dot{m}_{pn}$ – передавання маси від фази p до фази n . У задачах моделювання випускання продуктів згорання об'ємне джерело S_{α_n} у правій частині рівняння (35) дорівнює нулю.

Рівняння об'ємної частки (36) не розв'язується для первинної фази, для течії з N фазами її визначають на підставі обмеження:

$$\sum_{m=1}^N \alpha_n = 0. \quad (36)$$

У всій області розв'язується одне рівняння імпульсу, а результувальне поле швидкості розподіляється між фазами. Рівняння імпульсу, наведене нижче, залежить від об'ємних часток усіх фаз через властивості густини та в'язкості.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -p + \nabla(\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) + \rho \vec{g}. \quad (37)$$

Слід відзначити, що для випадку випускання продуктів згорання існують великі різниці швидкостей між фазами, тому точність швидкостей, обчислених поблизу поверхонь розділу, обчислена на підставі рівняння (37), буде мати суттєві похибки, але, зважаючи на відзначену вище задачу моделювання, вони не є визначальними.

Рівняння енергії також розподіляється між фазами й має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T), \quad (38)$$

де відповідно до формулювання VOF-моделі енергію E і температуру T розглядають як усереднені за масою змінні:

$$E = \frac{\sum_{n=1}^N \alpha_n \rho_n E_n}{\sum_{n=1}^N \alpha_n \rho_n}, \quad (39)$$

де E_n для кожної фази ґрунтується на питомій теплоємності цієї фази й спільній температурі.

Властивості, що містяться в рівняннях (35)–(39), визначаються наявністю фаз у кожному елементі розрахункової сітки. Для двофазної системи, якщо фази подані нижніми індексами «1» і «2» і якщо об'ємна частка другої з них відстежується, густину в кожному елементі визначають як:

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1, \quad (40)$$

усі інші властивості обчислюють аналогічно.

Рухомий елемент клапана випускання продуктів згорання моделюється як стінка, яка зміщується під дією прикладених сил – тиску, інерції, сили тяжіння та сили тертя:

$$m_v \frac{dv_v}{dt} = m_v g + \frac{\pi D_v^2}{4} p_{air} - F, \quad (41)$$

де m_v, v_v – маса та швидкість рухомого стакану клапана випускання продуктів згорання; D_v – його діаметр у частині, з'єднаній із мережевою повітряною магістраллю; p_{air} – тиск повітря в магістралі; F – сила тертя між ущільнювальними елементами й нерухомими частинами клапана.

Шукане значення сили додаткового супротиву визначалося як різниця між обчисленими a_{v_calc} та вимірними a_{v_exp} значеннями прискорення, помножена на масу рухомого стакану m_v . При цьому використовувались осереднені дані натурних експериментів після стабілізації часу відкривання клапана:

$$F = (a_{v_calc} - \bar{a}_{v_exp})m_v. \quad (42)$$

Залучивши вимірні дані зміни швидкості ковзання рухомого стакану за часом, силу додаткового супротиву визначали як функцію від швидкості ковзання $F(v_v)$.

До складу моделі введено цільовий критерій припустимої похибки часу спрацювання клапана:

$$t \in [t] \pm \delta(t). \quad (43)$$

Результати моделювання (рис. 8) доводять можливість захищення рухомого стакану водою впродовж усього часу випускання продуктів згоряння, гарантуючи його захист від впливу високих температур. Для розрахункових умов визначено рівень води, на який клапан необхідно занурити у воду для безпечної роботи, виходячи з нижньої межі робочого тиску продуктів згоряння в камері термоімпульсного обладнання.

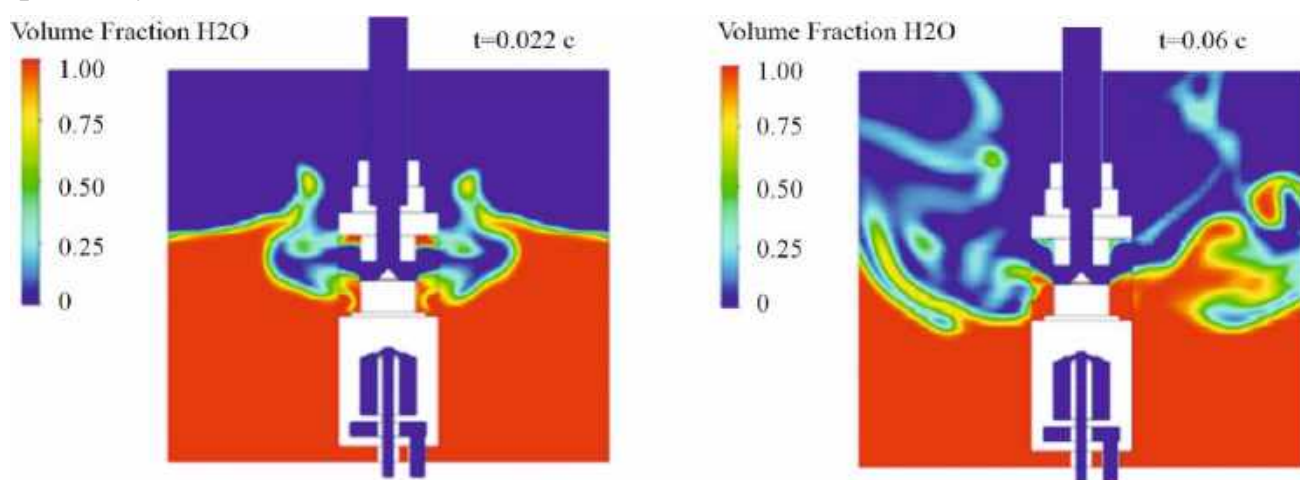


Рисунок 8 – Об’ємний вміст води в області біля клапана під час випускання продуктів згоряння

Основні наукові результати, наведені в другому розділі, опубліковано в працях автора [5, 6, 9, 11, 26, 27, 28, 31, 39, 40, 41, 42, 49, 55].

Третій розділ роботи присвячено розробленню методу визначення позиціонування деталей під час термоімпульсного оброблення. Позиціонування деталей у робочій камері запропоновано визначати, виходячи з мінімізації середньоквадратичного відхилення осередненого за поверхнею деталі питомого теплового потоку:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int_S (q - M(q))^2 dS}{\int_S dS}} \rightarrow \min, \quad (44)$$

де q – величина питомого теплового потоку на поверхні оброблюваної деталі з поверхнею S ; $M(q) = \int_S q dS / \int_S dS$ – математичне очікування величини питомого теплового потоку.

Виходячи з того що величина питомого теплового потоку в умовах дії ударних хвиль визначена частотою їхньої дії на точки поверхні деталей, умова (44) перетворена до мінімізації математичного очікування квадрату відстані між точками поверхні деталі й камери й для двовимірного випадку за збігу осей OX і OY із центром

ваги кривої Γ_Ω , що є межею області розміщення, набирає вигляду:

$$M(\|o_1 - o_\Omega\|^2) = (J_x^\Omega + J_y^\Omega)/L_\Omega + (x_{o_1}^2 + y_{o_1}^2) \rightarrow \min, \quad (45)$$

де L_Ω – довжина кривої Γ_Ω ; J_x^Ω, J_y^Ω – осьові моменти інерції кривої Γ_Ω відповідної вісі.

Це приводить до висновку, що оптимальним розташуванням під час термоімпульсного оброблення буде таке, за якого центри ваги й головні центральні осі інерції тонких оболонок, натягнутих на внутрішню поверхню камери й зовнішні поверхні деталей, збігаються. Такий висновок дозволив сформулювати умови заміни оригінальної деталі на еквівалентну, що замкнуло описаний у попередньому розділі метод еквівалентної камери, які полягають у наступному.

1. Центри ваги тонких оболонок, натягнутих на поверхні оригінальної й еквівалентної деталей, збігаються.

2. Головні центральні осі інерції тонких оболонок, натягнутих на поверхні оригінальної й еквівалентної деталей, збігаються.

3. Для оригінальної й еквівалентної деталей виконуються умови:

$$J_x^{\text{екв}}/S_{\text{екв}} = J_x^{\text{д}}/S_{\text{д}}, \quad J_y^{\text{екв}}/S_{\text{екв}} = J_y^{\text{д}}/S_{\text{д}}, \quad J_z^{\text{екв}}/S_{\text{екв}} = J_z^{\text{д}}/S_{\text{д}}. \quad (46)$$

Для підтвердження зроблених висновків було розв'язано низку тестових задач із визначення осередненого питомого теплового потоку для оригінальної деталі й еквівалентних. Приклад результатів наведено на рис. 9. Похибка визначення осередненого питомого теплового потоку не перевищувала 5 %, при тому що час обчислень скорочено від 2,5 до 5 разів. Ураховуючи час побудови розрахункових сіток, загальний час розв'язання скорочувався в 10–15 разів.

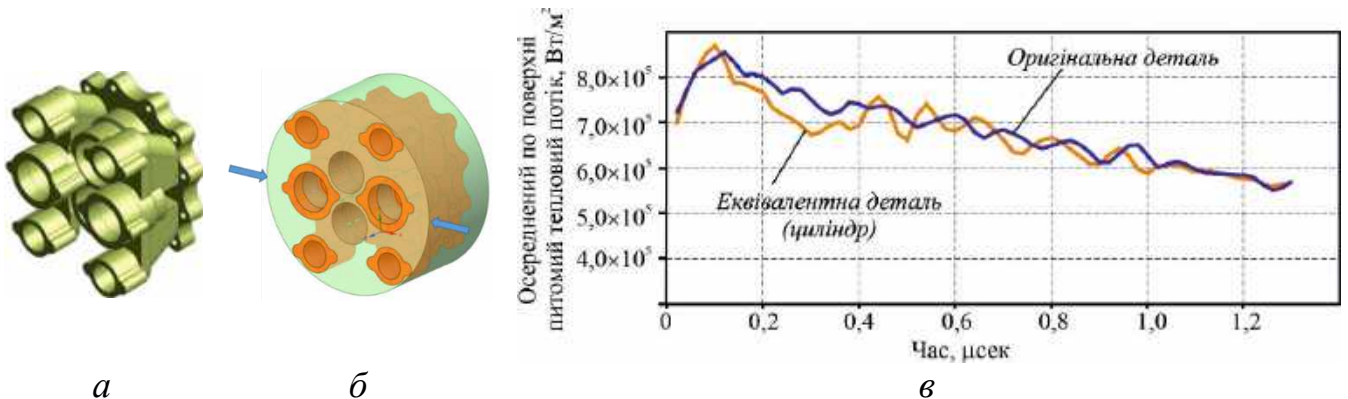


Рисунок 9 – Заміна оригінальної деталі (а) на еквівалентну деталь (б) і порівняння розрахункових величин питомого теплового потоку (в)

На підставі отриманих результатів для визначення розташування під час групового термоімпульсного оброблення було вперше сформульовано новий клас задач оптимального пакування – найбільш розрідженого балансного компоунування. Таке компоунування максимізує суму мінімальних відстаней між кожною парою оброблювальних деталей на полиці пристосування, а також між деталями й поверхнею камери.

Для розв'язання цієї задачі було застосовано метод ϕ -функцій, що дозволило звести її до задачі нелінійного програмування.

$$\max \sum_{s=1}^{m-1} \rho_s \text{ таке, що } (u, \tau) \in W, \quad (47)$$

$$W = \left\{ (u, \tau, \rho): \Phi'_{qg}(u_q, u_g, \tau_{qg}) \geq \rho_s, (q, g) \in \Xi^s, \Phi(u_q, \rho_s) \geq 0, \right. \\ \left. \Phi^{T_q K}(u_q) \geq 0, q \in I^s, \rho_s > 0, s \in J_{m-1}, Y(v) \geq 0 \right\}, \quad (48)$$

де $\rho = (\rho_1, \dots, \rho_{m-1})$, $\tau = (\tau^1, \dots, \tau^{m-1})$, $\tau^s = (\tau_{qg}, (q, g) \in \Xi^s)$, $s \in J_{m-1}$, τ_{qg} – вектор допоміжних змінних для псевдонормалізованої квазі-*phi*-функції для об'єктів $T_q(u_q)$ і $T_g(u_g)$, $(q, g) \in \Xi^s$, $s \in J_{m-1}$; $\Phi_q(u_q, \rho_s)$ – псевдонормалізована *phi*-функція для об'єктів $T_q(u_q)$ і $\mathfrak{Z}^*$, $q \in I^s, s \in J_{m-1}$, $I^s = \{q | T_q \subset \Omega^s\}$; $\Phi^{T_q K}(u_q)$ – псевдонормалізована *phi*-функція для об'єктів $T_q(u_q)$ і $K_\Omega, q \in I^s$; $Y(v) \geq 0$ установлює умови балансу $-\hat{\delta} \leq x_c \leq \hat{\delta}$, $-\hat{\delta} \leq y_c \leq \hat{\delta}$, $0 \leq z_c \leq h$.

Для термоімпульсного оброблення характерним є випадок, коли на кожній полиці повинні розташовуватися однакові деталі. У цьому випадку задача (47)–(48) зводиться до простішої задачі, сформульованої, наприклад, для полиці $s = 1$:

$$\max \rho_1 \text{ таке, що } (\hat{u}, \hat{\tau}) \in \hat{W}, \quad (49)$$

$$\hat{W} = \left\{ (\hat{u}, \hat{\tau}, \rho_1): \Phi'_{qg}(u_q, u_g, \tau_{qg}) \geq \rho_1, (q, g) \in \Xi^1, \right. \\ \left. \Phi_q(u_q, \rho_1) \geq 0, \Phi^{T_q K}(u_q) \geq 0, q \in I^1, \rho_1 > 0 \right\}. \quad (50)$$

Використання *phi*-функцій та аналогів булевих операцій із ними дозволяє створювати неперервні функції, які є позитивними всередині області деталі й негативними ззовні її. Таке описання форми деталі дозволяє визначати відстань до її поверхонь, а властивості *phi*-функцій дозволяють будувати алгоритми оптимального пакування. *Phi*-функції побудовані для основних геометричних примітивів, але для областей складної форми *phi*-функції можуть бути неефективними. Тому для розв'язання задачі позиціювання оригінальні деталі запропоновано замінювати на еквівалентні за процедурою, наведеною раніше. Розроблено покроковий алгоритм розв'язання цієї задачі за стратегією мултистарту. Проміжні результати розрахунку за запропонованим алгоритмом наведено на рис. 10.

Додатково розв'язано задачу найбільш розрідженого балансного компоунвання в умовах дії ударних хвиль. Показано, що для отримання найбільш рівномірного розподілу теплових потоків під час дії ударних хвиль найбільш розріджене компоунвання має узгоджуватися з розташуванням зони детонації паливної суміші (рис. 11).

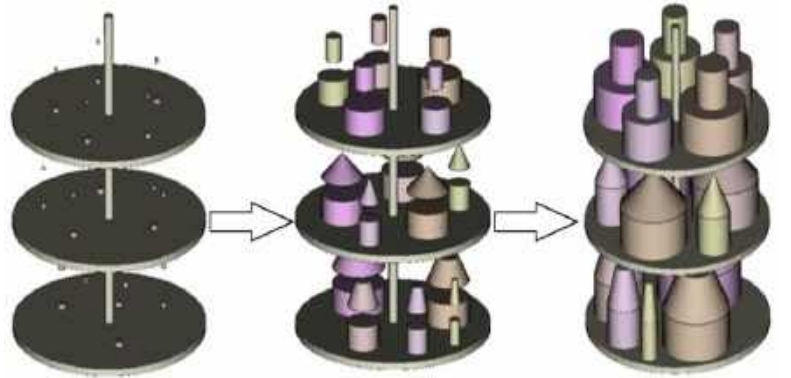


Рисунок 10 – Приклад реалізації алгоритму за стратегією мултистарту

Проведено аналіз можливості забезпечити рівномірність оброблення в умовах дії ударних хвиль різних за формою й розмірами об'єктів. Показано, що одночасне термоімпульсне оброблення таких деталей призводить до суттєвих похибок у величинах осереднених питомих теплових потоків (рис. 12). При цьому найбільш розріджене балансне компоунвання забезпечує найбільшу рівномірність розподілу

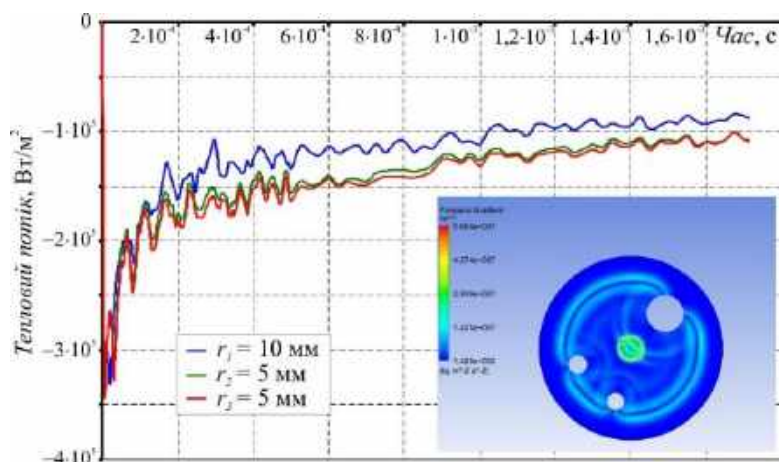


Рисунок 11 – Тепловий потік і градієнт тиску для задачі із забороненою зоною

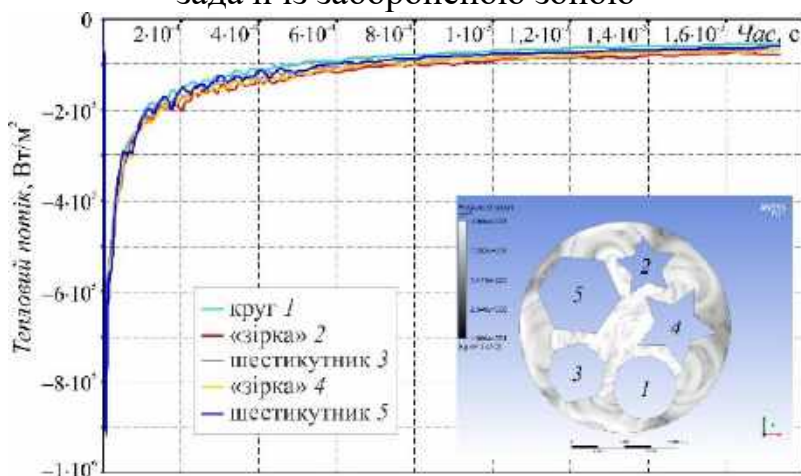


Рисунок 12 – Осереднений питомий тепловий потік і градієнт тиску для балансного компонування фігур різної геометрії

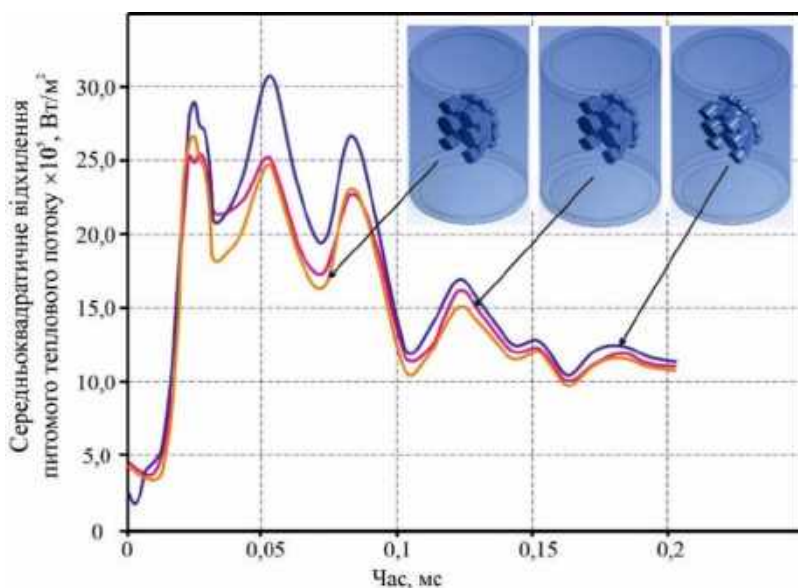


Рисунок 13 – Середньоквадратичне відхилення питомого теплового потоку для різних позицій деталі в камері

задирки й приховану теплоту плавлення.

питомих теплових потоків. Розв'язано задачу тривимірного розташування деталі в

робочій камері на підставі сформульованих принципів (рис. 13).

Протягом усього часу угадування ударних хвиль максимальне відхилення величини осередненого за поверхнею питомого теплового потоку для розташування деталі, за якого центри ваги й головні центральні осі інерції тонких оболонок, натягнутих на поверхню оброблюваної деталі та внутрішню поверхню камери, збігаються, виявилось оптимальним.

Основні наукові результати, наведені в третьому розділі, опубліковано у працях автора [23, 24, 32, 43, 44, 45, 53].

У четвертому розділі роботи розроблено метод визначення режимів термоімпульсного оброблення. На заміну суто експериментальному методу й наявному підходу верхньої оцінки за спрощеними формулами запропоновано методику розрахунку режимів термоімпульсного оброблення крайок за кваліметричними показниками, яка ґрунтується на моделі оплавлення під дією питомого теплового потоку певної інтенсивності. З огляду на особливості процесу в моделях ураховано нелінійність теплофізичних характеристик, зміну геометрії

Для опису процесу нагрівання крайки зі задирками використано нелінійне рівняння теплопровідності Фур'є:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}(T)) = 0, \quad (51)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності; c , ρ – теплоємність і густина матеріалу.

Для урахування зміни питомого теплового потоку під час нагрівання деталі на поверхні теплообміну під час оброблення з початковим тиском суміші p та початковою температурою T_p він заданий у вигляді:

$$q = \alpha_{ad}(T_{ad} - T_{part}), \quad (52)$$

$$\alpha_{ad} = \frac{1}{T_{ad} - T_0} \bar{q}_{eqv} p_0 \sqrt{\frac{pT_0}{p_0 T_p} \frac{S_{cham} + S_{eqv}}{S_{cham} + S_{part}}}, \quad (53)$$

де T_{ad} , – адіабатична температура згорання газової суміші; T_{part} – поточна температура деталі; p_0, T_0 – тиск і температура паливної суміші, для яких за методом еквівалентної камери розраховано осереднений за поверхнею еквівалентної деталі питомий тепловий потік $\bar{q}_{eqv} p_0$; $S_{cham}, S_{eqv}, S_{part}$ – площі поверхонь камери згорання, еквівалентної й оригінальної деталей відповідно.

Додатково питомий тепловий потік (52) осереднювався за тривалістю дії, що дозволяло під час проведення експериментів задавати його числовими значеннями. На поверхнях крайок деталей, які не є в контакт з паливною сумішшю, задавалася умова постійності температури. Прихована теплота плавлення урахувалася завданням стрибка теплоємності за досягнення температури плавлення. Урахування зміни геометрії задирки під час оплавлення здійснено за рахунок використання моделі «смерті елементу».

За результатами числового моделювання встановлено закономірності оплавлення задилок і формування округлення крайки залежно від їхніх геометричних параметрів (форма, товщина й довжина задирки, кут крайки) і величин питомого теплового потоку. Під час числового моделювання встановлено обмеження на час термоімпульсного оброблення залежно від товщини стінок деталей, на кромках яких видаляються задирки. Для ряду чистих металів, які є основою сплавів, що найбільш часто використовують для виготовлення прецизійних деталей, визначено відносну енергоємність термоімпульсного оброблення (рис. 14).

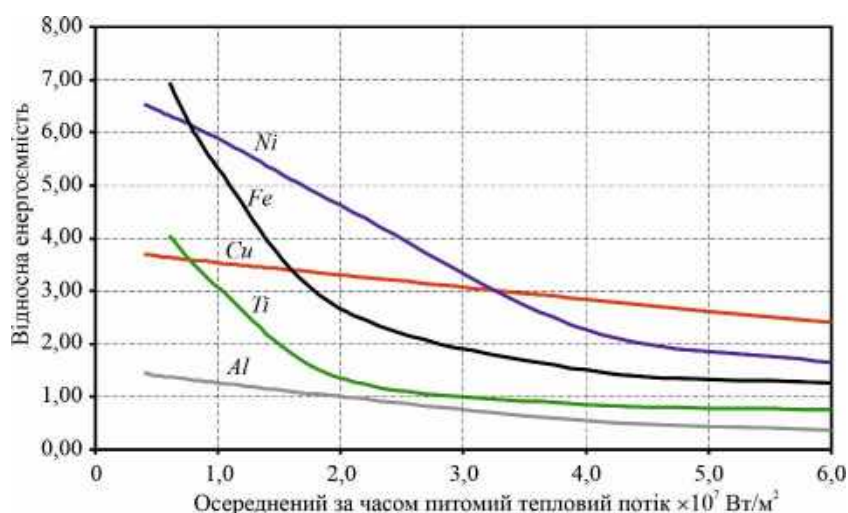


Рисунок 14 – Відносна енергоємність термоімпульсного оброблення деяких чистих металів

Розроблено метод призначення режимів термоімпульсного оброблення крайок

на підставі сумісного вирішення задач про визначення енергетичних характеристик устаткування й стану крайки під впливом питомого теплового потоку з відомою інтенсивністю, який дозволяє призначати технологічні параметри оброблення крайок за значеннями кваліметричного показника, ураховуючи граничні величини питомого теплового потоку в наступній послідовності.

Для ряду значень осередненого за часом питомого теплового потоку проведено моделювання оплавлення крайки із задиркою заданої геометрії. У результаті розрахунків побудовано серію кривих у координатах значення кваліметричного показника a за величиною часу оброблення t для фіксованого значення усередненого

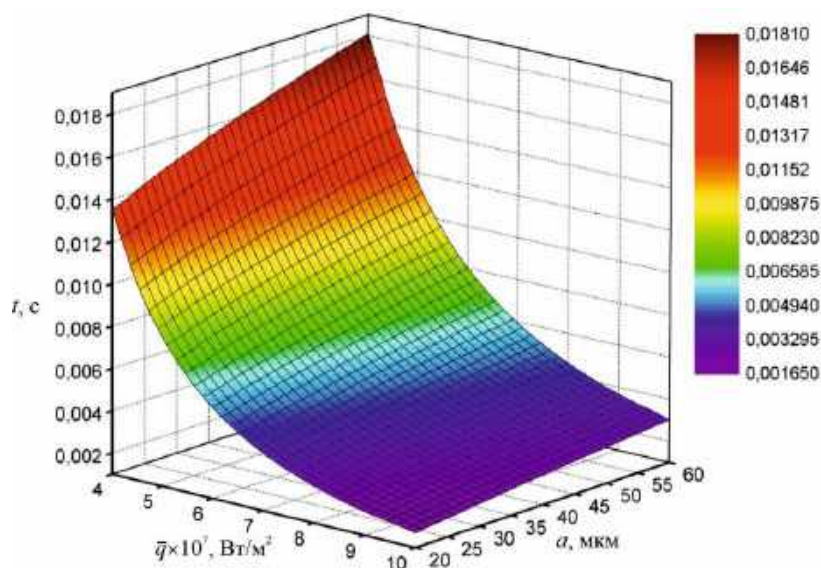


Рисунок 15 – Поверхня режимів термоімпульсного оброблення

за часом питомого теплового потоку $\bar{q}$. Серію таких кривих побудовано у вигляді каркаса поверхні в координатах $a - t - \bar{q}$, за яким побудовано поверхню режимів, наведену на рис. 15.

Для заданого значення кваліметричного показника крайки a поверхня режимів розсікається площиною $a = [a]$, що дає криву для визначення усередненого питомого теплового потоку та часу його дії (рис. 16, а). Для довільного тиску p_0 у

координатах $\bar{q}_{p_0} - t$ побудовано залежність питомого теплового потоку від часу $\bar{q}_{p_0}^{нов.} = f(t)$, яка додатково осереднюється за часом $\bar{q}_{p_0}^{нов.,час} = f(t)$ (рис. 16, б). Отримані залежності порівнюються, як показано на рис. 16, в. Якщо графіки $\bar{q}_{p_0}^{нов.,час}$ й $\bar{q}_{p_0}^{нов.}$ не мають ділянок спільних значень, початковий тиск суміші в камері слід корегувати наступним чином.

Якщо $\bar{q}_{p_0}^{нов.,час} \approx \bar{q}_{p_0}^{поор} < \bar{q}_{p_0}^{нов.,час}$ (рис. 16, в), то слід визначити величину питомого теплового потоку $\bar{q}_p^{нов.,час} = \min(\bar{q}_{p_0}^{нов.,час} - \bar{q}_{p_0}^{нов.})$, й потрібний тиск

$p = p_0 \left(\frac{\bar{q}_{p_0}^{нов.,час}(t^*)}{\bar{q}_{p_0}^{поор}(t^*)} \right)^2$. Якщо значення $\bar{q}_{p_0}^{нов.,час} \approx \bar{q}_{p_0}^{excess} > \bar{q}_{p_0}^{нов.,час}$ (рис. 16, в), то

визначити величину питомого теплового потоку як $\bar{q}_p^{нов.,час} = \max(\bar{q}_{p_0}^{нов.,час} - \bar{q}_{p_0}^{нов.})$

і відповідний тиск $p = p_0 \left(\frac{\bar{q}_{p_0}^{нов.,час}(t^*)}{\bar{q}_{p_0}^{excess}(t^*)} \right)^2$.

Для визначення технологічних параметрів термоімпульсного оброблення пластикових деталей треба додатково враховувати обмеження за температурою поверхневого шару оброблювальних деталей. Залежно від цього можуть бути реалізовані як звичайні режими оплавлення крайок, так і режими з додатковим термополіруванням поверхні. Установлено міцнісні обмеження під час термоімпульсного оброблення деталей із литва і деталей з анізотропією властивостей

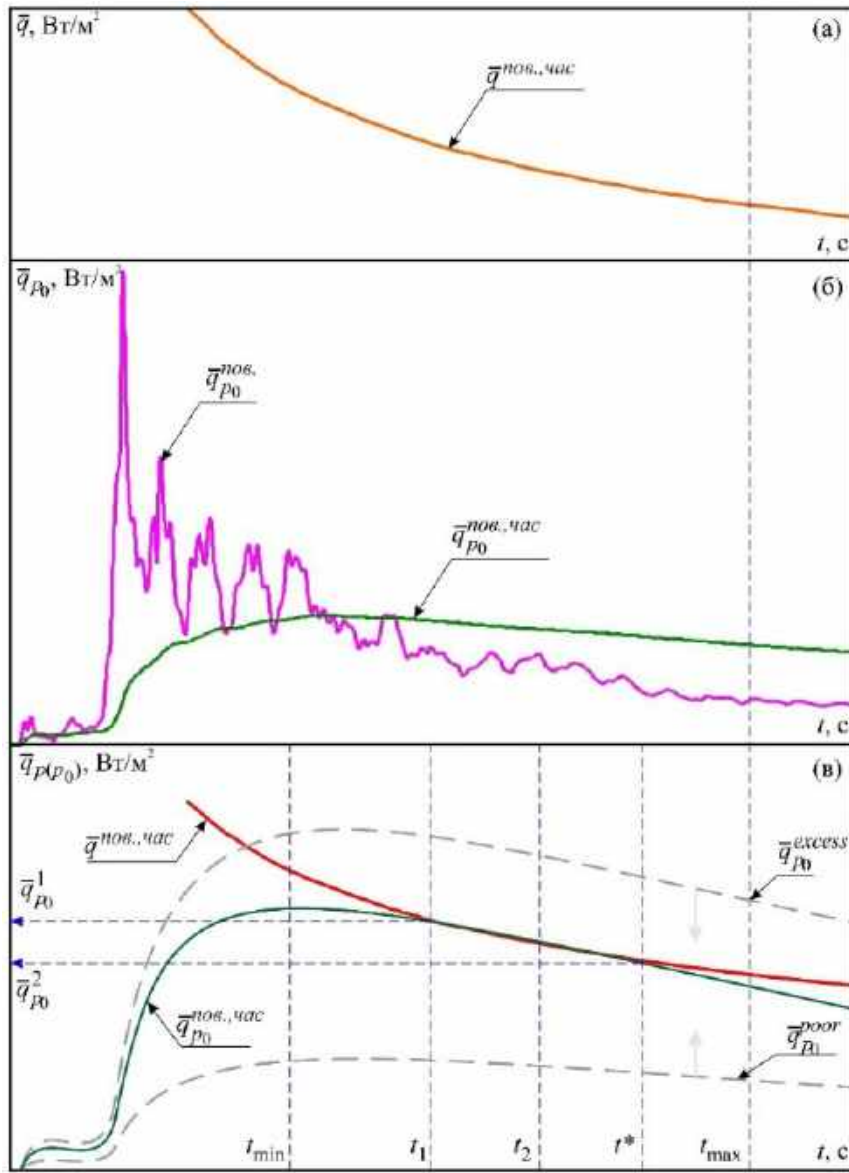


Рисунок 16 – Визначення режимів термоімпульсного оброблення

поверхневого шару, що з'являються під час термохімічного оброблення. Розв'язано задачу визначення термонапруженого стану під дією імпульсного теплового навантаження для нескінченного й скінченного циліндру радіусу R .

Для деталей, які мають змінний за глибиною коефіцієнт теплового розширення, встановлено залежність максимальних відносних напружень за глибиною шарів металу від часу дії термоімпульсного навантаження. Виходячи з цього, визначено обмеження на час дії питомого теплового потоку заданої інтенсивності, за якого зберігаються міцнісні характеристики поверхневого шару (54).

$$t < \frac{R^2}{a} \left\{ \begin{array}{l} \frac{-1,0868k + \sqrt{(-3,1161k + 8) \left(\frac{(k-1)T_0}{qr} + \frac{\sigma_{nl}^0 \lambda}{E\alpha q R} \right) + 1,1812k^2}}{-1,5581k + 4}, \\ - \left(\frac{T_0}{qr} + 0,44 \right) (k-1) - \frac{k}{4} < \frac{\sigma_{nl}^0 \lambda}{E\alpha q R} \leq 0, \\ - \frac{T_0}{2qr} - \frac{1}{8(k-1)} \left(k + 4 \frac{\sigma_{nl}^0 \lambda}{E\alpha q R} \right), \quad - \left(\frac{T_0}{qr} + 0,44 \right) (k-1) - \frac{k}{4} \geq \frac{\sigma_{nl}^0 \lambda}{E\alpha q R}. \end{array} \right. \quad (54)$$

де t – час; $a = \lambda/(\rho c)$ – коефіцієнт теплопровідності; λ – коефіцієнт теплопровідності; ρ – густина; c – питома теплоємність; T_0 – початкова температура; r – поточна координата; q – питомий тепловий потік; $\sigma_{пл}^0$ – межа плинності матеріалу; E – модуль пружності; α – коефіцієнт теплового розширення; $k = \alpha_1/\alpha_2$ – коефіцієнт пропорційності.

Для визначення міцнісних обмежень під час термоімпульсного оброблення деталей, виготовлених у ливарний спосіб, запропоновано таку методику.

На першому етапі визначають напружено деформований стан під сумісною дією імпульсного нагріву й тиску. У місці з найвищими значеннями еквівалентних напружень моделюють тріщину з розмірами відповідно до максимальної пори ливарної заготовки. На наступному етапі розраховують величини коефіцієнтів інтенсивності напружень K_I, K_{II}, K_{III} й оцінюють можливість макроруйнування деталі за критерієм Ірвіна $\max(K_I, K_{II}, K_{III}) = K_c$, де K_c – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень матеріалу деталі. Додатково для забезпечення вимоги відсутності мікротріщин визначають енергетичний критерій у вигляді: $J < J_c$, де $J = \int_{\Gamma} (W dy - \sigma_{ij} n_i \frac{\partial u_j}{\partial x}) ds + \int_A \alpha \sigma_{ij} \delta_{ij} \frac{\partial T}{\partial x} dx dy$ – (тут J -інтеграл Черепанова-Райса; Γ – контур інтегрування, навколо вершини тріщини; A – область усередині контуру Γ ; $W = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$ – густина енергії деформації; n_i – зовнішня нормаль до контуру Γ ; δ_{ij} – символ Кронекера). Достовірність розробленої методики підтверджено даними

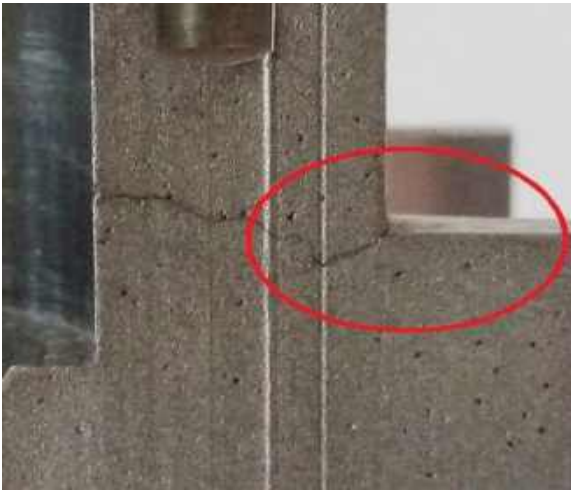


Рисунок 17 – Деталь після термоімпульсного оброблення

натурних експериментів. На рис. 17 наведено зону початку розвитку тріщини корпусної деталі агрегату після термоімпульсного оброблення. Неправильно призначений режим призвів до того, що в зоні концентрації напружень виникла тріщина, яка поширилася на всю товщину стінки деталі. Зона виникнення тріщини відповідає місцю руйнування, визначеному в результаті числового моделювання.

Ураховуючи отримані результати, розроблено блок-схему визначення міцнісних обмежень й алгоритм автоматизованого призначення технологічних параметрів

термоімпульсного оброблення.

Визначено вимоги до точності забезпечення питомого теплового потоку, виходячи зі встановлених стандартом допусків на відхилення форми крайки. Ураховуючи раніше встановлений зв'язок між точністю компонентного складу й відхиленням теплового потоку, визначено вимоги до точності дозування компонент паливної суміші: від 0,1 до 0,5 %. Виходячи з тих же умов, система керування термоімпульсної установки повинна забезпечувати завдання часу оброблення з похибкою від 0,006 до 0,01 с.

Основні наукові результати, наведені в четвертому розділі, опубліковано в працях автора [8, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 29, 38, 46, 54, 59, 60].

У п'ятому розділі роботи для забезпечення сформульованих вимог до точності

дозування компонент паливної суміші запропоновано технічні рішення щодо способу генерації паливної суміші для термоімпульсного оброблення й обладнання для його реалізації. Показано, що зазначені вимоги можуть бути досягнуті шляхом генерації паливної суміші з контрольованою масовою витратою G_{δ} , G_i базового та i -го компонента суміші, при цьому точність дозування визначена умовою $\beta_i = \frac{\int_0^{\tau} G_i dt}{\int_0^{\tau} G_{\delta} dt}$.

Для цього реалізовано спосіб генерації, за якого здійснюють одночасне подавання компонентів через отвори із критичним перерізом до змішувача зі швидкістю, яка дорівнює місцевій швидкості звуку. При цьому компоненти суміші необхідно подавати з попередньо наповнених проміжних посудин регульованого об'єму з забезпеченням рівної температури газів у проміжних посудинах протягом витікання. Площа перетину отворів із критичним перерізом та об'єми проміжних

посудин задають виразами $F_i = \beta_i F_{\delta} \frac{\mu_{\delta} \sqrt{M_{\delta}}}{\mu_i \sqrt{M_i}} \sqrt{\frac{k_{\delta}^{\frac{k_{\delta}+1}{k_{\delta}-1}}}{k_i^{\frac{k_i+1}{k_i-1}}}}$ та $V_i = \beta_i V_{\delta} \frac{\mu_{\delta} M_{\delta} k_{\delta}-1}{\mu_i M_i k_i-1}$,

де M_{δ} та M_i – молярні маси; μ_{δ} та μ_i – коефіцієнти витрат жиклерів; k_{δ} , k_i – показники адіабати базового та i -го компонентів суміші.

Визначення початкового тиску в проміжних посудинах здійснюють за виразом

$$P_{0i} = P_{0\delta} \frac{\int_0^{\tau} (1+B_{\delta}t)^{\frac{k_{\delta}+1}{k_{\delta}-1}} dt}{\int_0^{\tau} (1+B_i t)^{\frac{k_i+1}{k_i-1}} dt}, \text{ де } R_{\delta}, R_i \text{ – газові сталі базового та } i\text{-го компонента суміші;}$$

$$B_{\delta} = \frac{(k_{\delta}-1)F_{\delta}\sqrt{R_{\delta}T_0}}{2V_{\delta}} \sqrt{k_{\delta} \left(\frac{1+2}{k_{\delta}}\right)^{\frac{k_{\delta}+1}{k_{\delta}-1}}}; \quad B_i = \frac{(k_i-1)F_i\sqrt{R_iT_0}}{2V_i} \sqrt{k_i \left(\frac{1+2}{k_i}\right)^{\frac{k_i+1}{k_i-1}}}; \quad T_0 \text{ – початкова}$$

температура в проміжних посудинах.

Новизна запропонованого способу підтверджена патентом України на винахід. Розроблено й виготовлено генератор паливної суміші (рис. 18, а), який реалізує запропонований спосіб.

Спроектовано та виготовлено блок високоенергетичного іскрового запалювання з регульованою енергією іскрового розряду (рис. 18, б), який складається з корпусу 1, кришки 2, імпульсного трансформатора 3, контрольного розрядника 4, регулятора 5, формувача 6, конденсаторів 7, 8, підвищувального трансформатора 9 і має характеристики, наведені в табл. 2. Блок призначений для періодичного надійного запалювання горючих газових сумішей із підвищеною мінімальною енергією запалювання в середовищах атмосферного й високого тиску з можливістю прямої ініціації детонації. До складу системи підпалу входять розроблені спеціальні свічки запалювання (рис. 18, в), які складаються з корпусу 1, розрядних електродів 2, коронарних розрядників 3, регулятора іскрового зазору 4 і завдяки яким ефективно реалізується режим прямої ініціації детонації паливної суміші. Розроблена система підпалу скорочує час і відстань переходу горіння в детонацію.

На вимогу забезпечення потрібного часу оброблення деталі й для узгодження роботи систем ініціації згоряння та керованого випускання, модифіковано випускний клапан термоімпульсного обладнання й додано сенсори контролю положення.



а



б



в

Рисунок 18 – Блок генерації паливної суміші (а), система запалювання (б) зі свічкою ініціації детонації (в) термоімпульсного обладнання

Таблиця 2 – Характеристика блока високоенергетичної ініціації згорання

Параметр системи	Величина
Напруга живлення, В	220
Потужність, споживана блоком, Вт	до 500
Амплітуда вхідного імпульсу, В	15–30
Тривалість вхідного імпульсу, мкс	понад 10
Амплітуда вихідного імпульсу напруги, кВ	до 30
Амплітуда вихідного імпульсу струму, А	до 240
Частота запалювання, Гц	до 50
Енергія розряду, Дж	0,01...1
Тривалість розряду, мкс	до 350
Регулювання енергії розряду	Допускається

Проведено експериментальні дослідження з вимірювання швидкості спрацьовування клапана випускання продуктів згорання (рис. 19, а) із використанням електромагнітного клапана управління 1 та інкрементального енкодера 2 із роздільною здатністю 3000 імпульсів на один оберт. Установлено, що за першого пуску клапана час відкриття сягає 100 мс, але за подальших запусків цей час зменшується й стабілізується на значенні близько 50 мс (рис. 19, б). Для

досліджуваної конструкції випускного клапана збільшення швидкості спрацьовування до величини 0,01 с за рахунок підвищення тиску є неефективним. Ухвалене рішення про модернізацію схеми роботи системи випускання продуктів згорання за рахунок попереднього подання тиску на відкриття клапана з його утриманням електромагнітом.

Для калібрування числових моделей розроблено й виготовлено модульний автономний реєстратор експериментальних даних (рис. 20), який не потребує з'єднання зі зовнішньою вимірювальною апаратурою. Відповідно до концепції розробленого методу еквівалентної камери, зовнішня форма пристрою складається з геометричних примітивів. З'єднуючи ці елементи як у своєрідному конструкторі, можна отримувати велику кількість різних варіантів форми реєстратора.

Апаратний комплекс модульного автономного автоматичного реєстратора складається з різних сенсорів питомих теплових потоків, тиску, температури 1, окремих блоків аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналів сенсорів 2, блока реєстрації сигналів 3, що виконує збір даних із блоків АЦП, забезпечує їхнє зберігання та подальше передання в ПК, акумулятора автономної дії 4. Програмна частина комплексу реалізована на базі програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС), узагальнену структуру якої наведено на рис. 21. Конфігурація ПЛІС є логічною схемою, що виконує алгоритми паралельно й дозволяє реалізовувати оброблення сигналів у реальному часі на

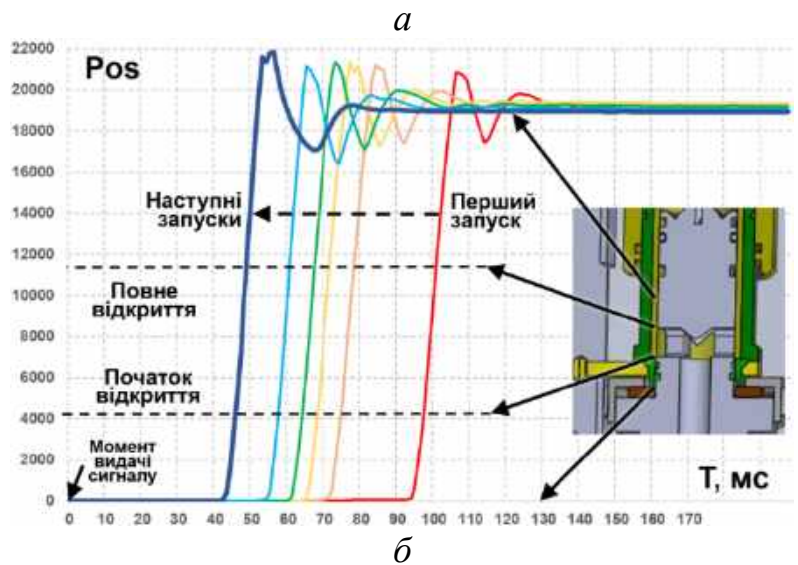
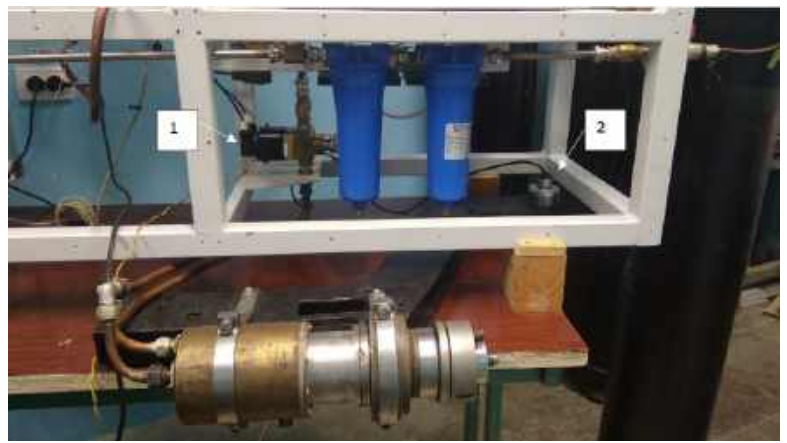


Рисунок 19 – Експериментальні дослідження клапана випускання продуктів згорання: випробувальний стенд (а); виміряні швидкості спрацьовування клапана (б)

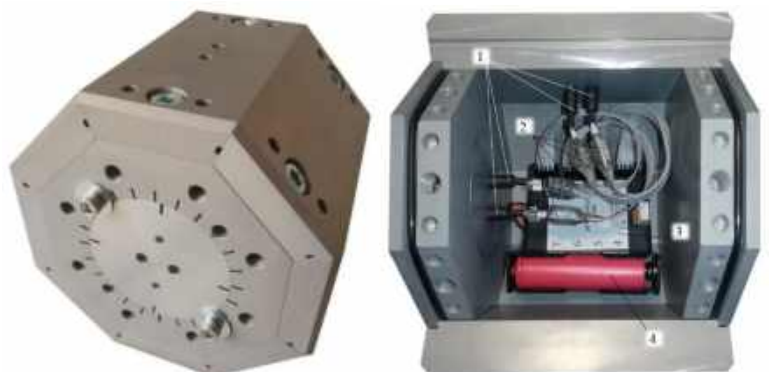


Рисунок 20 – Модульний автономний автоматичний реєстратор даних

частотах до сотень мегагерц. Це забезпечує високу швидкість, стабільність і відмовостійкість розробленого пристрою. Синхронізація часу кожного експерименту здійснюється за моментом надходження команди запуску реєстрації даних, що приходить до ПЛІС від датчика запуску / зупинки.

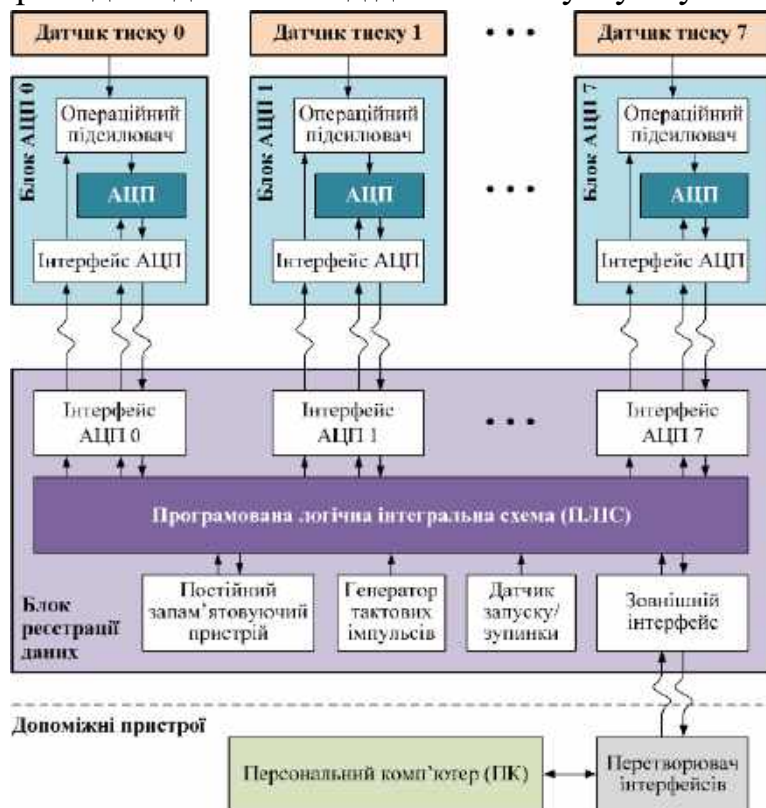


Рисунок 21 – Блок-схема програмно-апаратного комплексу реєстрації даних

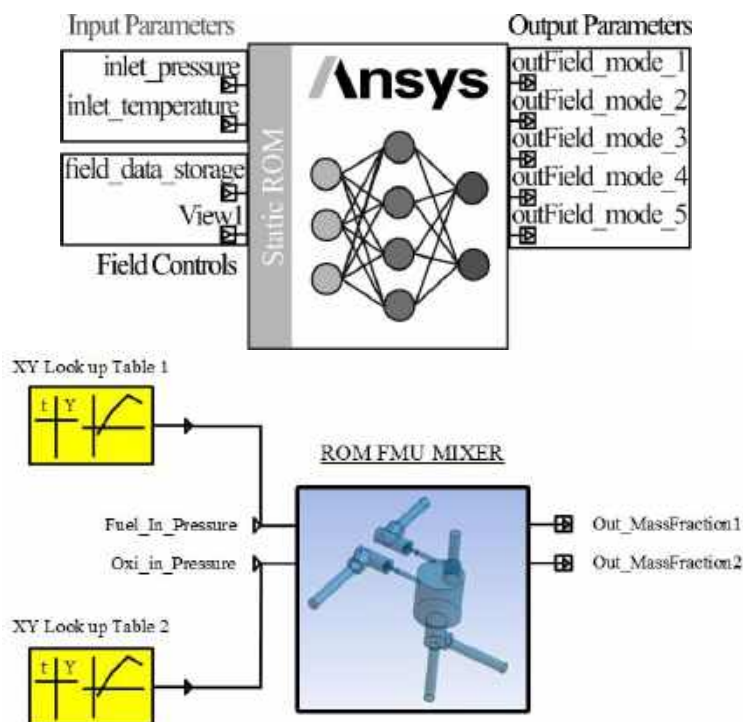


Рисунок 22 – Будова цифрового близнюка змішувача компонентів газової суміші

Для організації точного управління роботою пневмогазових систем термоімпульсного обладнання використовують електромагнітні клапани, які не мають можливості безперервного регулювання витрати компонента суміші, що подається. Застосування запропонованої концепції забезпечення витрати за допомогою надкритичних сопел забезпечує прогнозовану витрату компонента, але не враховує перехідні процеси відкриття / закриття керувальних клапанів, що істотно впливає на точність дозування.

Для розв'язання цієї задачі отримано за експериментальною осцилограмою змінення тиску в магістралі подання газу під час відкривання й закривання клапана, побудовано імітаційну модель спрацьовування клапана для подальшого використання її під час налаштування адекватного сигналу керування системою.

Для керування та моніторингу роботи автоматизованого обладнання термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами розроблено методику побудови цифрових близнюків на підставі комбінації моделей зниженого порядку (ROM) робочих процесів оброблення й одновимірних моделей для стандартних елементів газового тракту (рис. 22).

Побудовано й протестовано цифровий близнюк блока змішувача системи генерації паливної суміші. Установлено, що використання цифрових близнюків дозволяє із забезпеченням високої точності отримуваних результатів суттєво скоротити час їхнього визначення за рахунок використання ROM-моделей, які імітують роботу виконавчих елементів (клапанів) і моніторингу (сенсорів).

Розроблено й виготовлено систему автоматизованого числового керування й контролю процесів прецизійного термоімпульсного обладнання (рис. 23). Передбачено можливість синхронізації зовнішніх вимірювальних пристроїв із внутрішнім циклом системи ЧПК.



Рисунок 23 – Стійка числового програмного керування обладнанням

Процес реєстрації даних здійснюється паралельно з процесом управління устаткуванням і не впливає на нього. Тому в процесі збирання даних виконують тільки запис даних. Аналіз та оброблення результатів здійснюють після закінчення циклу вимірювань із використанням як програмного забезпечення ЧПК, так і спеціалізованих програмних засобів. Розроблені моделі, алгоритми та технічні рішення для систем термоімпульсного обладнання та системи ЧПК дозволяють забезпечити встановлені вимоги щодо точності генерації суміші, часу оброблення та стабільності цих параметрів за циклічної роботи.

Основні наукові результати, наведені в п'ятому розділі, опубліковано в працях автора [21, 22, 25, 30, 34, 35, 37, 47, 48, 50, 51, 52, 57, 58].

ВИСНОВКИ

Наслідком проведених у дисертаційній роботі комплексних теоретичних і експериментальних досліджень є розроблені наукові основи прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами. *Наукові основи* полягають у створенні нового інструментарію вирішення науково-технічної проблеми комплексної автоматизації проєктування технології й обладнання фінішного прецизійного оброблення продуктами згоряння газових сумішей на основі математичного моделювання процесів фізико-технічного оброблення матеріалів і

науково обґрунтованих технічних рішень виконавчих систем обладнання. Основи містять науково обґрунтовані методи, моделі, методики й нові технічні рішення, спрямовані на автоматизацію призначення режимів і обладнання для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами.

Під час виконання поставлених завдань дослідження дисертаційної роботи отримано такі результати.

1. Розроблено й досліджено комплекс математичних моделей, що описують робочі процеси систем термоімпульсного обладнання з урахуванням вимог до прецизійності їхньої роботи, а саме генерації паливної суміші, ініціації горіння, згоряння паливної суміші, беручи до уваги теплообмін і випускання продуктів згоряння. Склад моделей визначено, зважаючи на особливості, притаманні процесу термоімпульсного оброблення, і для всіх моделей уведено критерії, які забезпечують визначення показників якості, спрямованих на забезпечення прецизійності оброблення. Проведено комплексну верифікацію зазначених моделей із даними натурних експериментів, отриманих як під час досліджень у межах роботи, так і в роботах, виконаних іншими авторами. Для розроблених моделей похибка порівняно з експериментальними даними становить від 0,5 до 6%, що в усіх випадках перебуває в межах точності експериментальних вимірювань.

2. Для розв'язання задачі просторового розташування деталей під час термоімпульсного оброблення для забезпечення умов стабільної якості оброблення за рахунок найбільш рівномірного розподілу оброблювального середовища сформульовано задачу найбільш розрідженої балансної компоновки й розроблено метод її розв'язання з використанням апарату ρ -функцій. Показано, що у випадку оброблення одиначної деталі така задача може бути розв'язана суміщенням центрів ваги та головних центральних осей інерції тонких оболонок, які збігаються із зовнішньою поверхнею деталі та внутрішньою поверхнею робочої камери. Розроблено алгоритмічне забезпечення розв'язання сформульованих задач для базових геометричних примітивів та їхніх композицій.

3. Отримав подальший розвиток метод еквівалентної камери щодо задач термоімпульсного оброблення деталей складної форми. На відміну від раніше використовуваних підходів показано, що для застосування методу необхідно забезпечити суміщення центрів ваги й головних центральних осей інерції тонких оболонок, що збігаються з поверхнями оригінальної й еквівалентної деталей, а розміри еквівалентної деталі визначати з умови зменшення головних центральних моментів інерції вказаних оболонок стосовно головних центральних моментів інерції оригінальної деталі зі зворотньо пропорційним відношенням їхніх площ.

4. Розроблено метод призначення режимів термоімпульсного оброблення крайок на підставі сумісного розв'язання задач про визначення енергетичних характеристик устаткування й стану крайки під впливом питомого теплового потоку з відомою інтенсивністю, який дозволяє призначати технологічні параметри оброблення крайок за значеннями кваліметричного показника, ураховуючи граничні

величини питомого теплового потоку за умовами міцності. Показано, що під час термоімпульсного зачищення облою на деталях із термопластів призначення режимів оброблення має здійснюватися з урахуванням змінення температури в облої і на поверхні деталі та очікуваного діапазону змінення товщини й довжини облою. Виходячи зі встановлених вимог щодо точності кваліметричних показників крайок, визначено вимоги до точності дозування компонент паливної суміші й часу термоімпульсного оброблення.

5. На підставі числового моделювання встановлено міцнісні обмеження під час термоімпульсного оброблення деталей з литва й деталей з анізотропією властивостей поверхневого шару, що з'являється під час термохімічного оброблення – цементації, азотуванні та ін. Зокрема досліджено й визначено закономірність розвитку тріщини в деталі, виготовленої з литої заготовки з характерними структурними неоднорідностями під дією термічних напружень, притаманних термоімпульсному обробленню. Для деталей, що пройшли попереднє термохімічне оброблення й мають відмінність у концентрації вуглецю й азоту за глибиною поверхневого шару металу й, як наслідок, змінний за глибиною коефіцієнт теплового розширення, встановлено залежність максимальних відносних напружень за глибиною шарів металу від часу дії термоімпульсного навантаження.

6. Для забезпечення встановлених вимог щодо точності дозування компонент паливної суміші на рівні 0,1% під час прецизійного термоімпульсного оброблення запропоновано використання способу генерації, за якого здійснюють одночасне подання компонентів через отвори із критичним перерізом. При цьому компоненти суміші подаються з попередньо наповнених проміжних посудин регульованого об'єму з забезпеченням рівної температури газів в проміжних посудинах протягом витікання. Розроблено й виготовлено генератор паливної суміші, який реалізує запропонований спосіб.

7. Спроектовано та виготовлено систему ініціації керованого згорання, яка містить блок високоенергетичного іскрового запалювання з регульованою енергією іскрового розряду й спеціальні свічки запалювання, завдяки яким ефективно реалізуються режими прямої ініціації детонації паливної суміші. Із використанням розробленої системи можлива не тільки реалізація термоімпульсного оброблення за різними режимами згорання, але й оброблення з примусовою генерацією ударних хвиль, що є найбільш перспективним шляхом підвищення ефективності термоімпульсного оброблення.

8. Удосконалено конструкцію клапана керованого випускання продуктів згорання з робочої камери термоімпульсної установки. На відміну від раніше використовуваної конструкції, запропоновано здійснювати попереднє подання тиску на відкриття клапана з його утриманням електромагнітом. Це дозволяє досягти необхідних показників як за швидкістю спрацьовування (на рівні 0,01 с), так і за його стабільністю. Окрім цього, на вимогу забезпечення потрібного часу оброблення деталі, для узгодження роботи систем ініціації згорання та керованого випускання

клапан обладнано засобами контролю положення (енкодерами).

9. Для калібрування числових моделей розроблено та виготовлено модульний автономний автоматичний реєстратор експериментальних даних, який не потребує з'єднання зі зовнішньою вимірювальною апаратурою. Пристрій розміщується безпосередньо в камері термоімпульсного обладнання, має в собі необхідну кількість датчиків, а також енергонезалежну систему зчитування, перетворення та зберігання інформації. Апаратне й програмне забезпечення реєстратора в поєднанні з розробленими числовими моделями робочих процесів термоімпульсного оброблення є базою для повної автоматизації проектування процесів фінішного оброблення детонувальними газовими сумішами з гарантованим рівнем якості деталей.

10. Для керування й моніторингу роботи автоматизованого обладнання термоімпульсного оброблення газовими сумішами розроблено методику побудови цифрових близнюків на підставі комбінації моделей зниженого порядку (ROM-моделі) робочих процесів оброблення й одновимірних моделей для стандартних елементів газового тракту, яка дозволяє зі забезпеченням високої точності отримуваних результатів суттєво скоротити час їхнього визначення за рахунок використання моделей процесів зниженого порядку й використання стандартних елементів бібліотек Twin Builder та Modelica, які імітують роботу елементів управління (клапанів) й моніторингу (сенсорів). Розроблені моделі, алгоритми та технічні рішення для систем термоімпульсного обладнання та системи ЧПК дозволяють забезпечити встановлені вимоги щодо точності генерації суміші, часу оброблення та стабільності цих параметрів за циклічної роботи.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, у яких опубліковані основні наукові результати дисертаційної роботи.

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

1. Сучасний стан та перспективи розвитку технологій фінішної обробки прецизійних деталей літальних апаратів / С. І. Планковський, О. В. Лосєв, О. В. Шипуль, О. С. Борисова // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2010. – № 2 (69). – С. 39–47.

2. Шипуль О. В. Тенденции развития прецизионного производства / О. В. Шипуль // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т»*. – Харьков, 2015. – Вып. 1 (81). – С. 77–90.

3. Шипуль О. В. Сучасні методи фінішного упорядження крайок прецизійних деталей / О. В. Шипуль // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2015. – № 4 (121). – С. 16–25.

4. Планковский С. И. Проблемы развития методов финишной отделки и очистки интенсивными тепловыми потоками / С. И. Планковський, О. В. Шипуль //

Проблемы машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 2. – С. 72–82.

5. Моделювання термоімпульсної обробки з урахуванням неоднорідності паливної суміші / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, О. С. Борисова // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. / Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2010. – Вип. 46. – С. 75–87.

6. Сумішоутворення в камерах термоімпульсних машин при обробці деталей агрегатів двигунів ЛА / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, В. Г. Козлов // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2010. – № 9 (76). – С. 7–11.

7. Моделювання теплообміну при загасанні ударних хвиль в замкнутій камері / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, Є. С. Палазюк, В. Л. Малащенко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2014. – № 1 (108). – С. 104–109.

8. Методика розрахунку теплових потоків при термоімпульсній обробці детонуючими газовими сумішами / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, Є. С. Палазюк, С. О. Красовський // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2014. – № 6 (113). – С. 17–23.

9. Числове дослідження змішування в системі генерації газової суміші / В. Є. Гайдачук, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський, В. О. Гарін, О. В. Трифонов, С. І. Планковський // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2021. – № 6 (176). – С. 39–48. DOI: 10.32620/aktt.2021.6.05.

10. Розрахунок теплових потоків при термоімпульсному обробленні з форкамерно-факельним підпалюванням / О. В. Шипуль, Є. В. Цегельник, В. Л. Малащенко, С. О. Красовський // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. / Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2013. – Вип. 62. – С. 89–97.

11. Числове та експериментальне дослідження наповнення резервуару компонентом газової суміші / О. В. Шипуль, С. О. Заклінський, В. В. Комбаров, О. А. Павленко, В. О. Гарін // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2021. – № 4 (172). – С. 63–72. DOI: 10.32620/aktt.2021.4.09.

12. Методика вибору параметрів форкамери для термоімпульсної обробки деталей з пластмас / О. В. Шипуль, Є. В. Цегельник, В. Л. Малащенко, С. О. Красовський // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. / Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2013. – Вип. 61. – С. 39–46.

13. Моделювання процесу оплавлення задирок при термоімпульсній обробці детонуючими сумішами / О. В. Шипуль, С. І. Планковський, О. В. Гайдачук, Є. С. Палазюк // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2013. – № 3 (100). – С. 4–11.

14. Методика назначенія режимов термоимпульсной зачистки деталей из термопластов / С. И. Планковский, А. Н. Мещеряков, О. В. Шипуль, В. Л. Малащенко // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов

: сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т». – Харьков, 2013. – Вып. 4 (76). – С. 94–105.

15. Аналіз термічних напружень деталі під дією термоімпульсного навантаження / О. В. Шипуль, В. Б. Минтюк, Д. А. Брега, С. О. Крицький // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. / Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авиац. ін-т». – Харків, 2016. – Вип. 72. – С. 77–90.

16. Кузнецов І. Б. Математичне моделювання напруженого стану деталей військової техніки при детонаційній очистці / І. Б. Кузнецов, Є. В. Цегельник, О. В. Шипуль // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. / Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авиац. ін-т». – Харків, 2016. – Вип. 73. – С. 44–51.

17. Дослідження тріщиностійкості деталі під дією термоімпульсного навантаження / О. В. Шипуль, І. Б. Кузнецов, Г. С. Тевзадзе, Р. О. Ходек // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2017. – № 1 (136). – С. 67–72.

18. Планковський С. І. Алгоритм призначення режимів термоімпульсної обробки з урахуванням міцнісних обмежень / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, Є. В. Цегельник // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2018. – № 4 (148). – С. 63–71. DOI: 10.32620/aktt.2018.4.09.

19. Планковський С. І. Математична модель опорядження крайок при термоімпульсній обробці / С. І. Планковський, О. В. Шипуль // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2015. – № 9 (126). – С. 51–55.

20. Шипуль О. В. Методика призначення режимів термоімпульсного опорядження з урахуванням вимог до якості кромки / О. В. Шипуль, І. Б. Кузнецов, Є. С. Палазюк // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2015. – № 5 (122). – С. 21–26.

21. Модульний автономний автоматичний реєстратор параметрів термоімпульсного оброблення / О. А. Павленко, Є. О. Аксьонов, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2022. – № 4 (180). – С. 68–78. DOI: 10.32620/aktt.2022.4.08.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку:

22. Development of a digital twin for gas mixing in a generator / O. Shypul, V. Garyn, D. Tkachenko, S. Plankovsky, O. Tryfonov // Hungarian Journal of Industry and Chemistry. – 2023. – Vol. 51, iss. 1. – P. 35–42. DOI: 10.33927/hjic-2023-06

Статті у наукових періодичних виданнях включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

23. Sparsest packing of two-dimensional objects / T. Romanova, A. Pankratov, I. Litvinchev, S. Plankovsky, Y. Tsegelnyk, O. Shypul // International Journal of Production Research. – 2021. – Vol. 59, iss. 13. – P. 3900–3915. DOI: 10.1080/00207543.2020.1755471. **Scopus, Q1**

24. Sparsest balanced packing of irregular 3D objects in a cylindrical container / T. Romanova, Y. Stoyan, A. Pankratov, I. Litvinchev, S. Plankovskyy, Y. Tsegelnyk, O. Shypul // *European Journal of Operational Research*. – 2021. – Vol. 291, iss. 1. – P. 84–100. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.09.021. **Scopus, Q1**

25. Optical and electrical investigation of plasma generated by high-energy self-stabilized spark ignition system / M. Janda, K. Korytchenko, O. Shypul, S. Krivosheev, O. Yeresko, A. Kasimov // *Physics of Plasmas*. – 2023. – Vol. 30, iss. 5. – Paper No. 053501. DOI: 10.1063/5.0141261. **Scopus, Q1**

26. Determination of detonable gas mixture heat fluxes at thermal deburring / S. Plankovskyy, A. Teodorczyk, O. Shypul, O. Tryfonov, D. Brega // *Acta Polytechnica*. – 2019. – Vol. 59, iss. 2. – P. 162–169. DOI: 10.14311/AP.2019.59.0162. **Scopus, Q2**

27. Simulation of surface heating for arbitrary shape's moving bodies/sources by using R-functions / S. Plankovskyy, O. Shypul, Ye. Tsegelnyk, O. Tryfonov, I. Golovin // *Acta Polytechnica*. – 2016. – Vol. 56, iss. 6. – P. 472–477. DOI: 10.14311/AP.2016.56.0472. **Scopus, Q3**

28. Constructions of the experimental-estimation model for releasing combustion products at thermal pulse processing / O. Tryfonov, O. Shypul, S. Plankovskyy, V. Garin // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2022. – Vol. 6, iss. 1. – P. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.267798. **Scopus, Q3**

29. Shypul O. Transient thermoelastic analysis of a cylinder having a varied coefficient of thermal expansion / O. Shypul, V. Myntiuk // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 64, iss. 4. – P. 273–278. DOI: 10.3311/PPme.14733. **Scopus, Q3**

30. Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies / S. I. Plankovskyy, O. V. Shypul, S. A. Zaklinskyy, O. V. Tryfonov // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2018. – № 6 (118). – P. 189–193. – Mode of access: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2018_6/article_2018_6_189.pdf **Scopus, Q3**

31. Numerical simulation of gap length influence on energy deposition in spark discharge / K. Korytchenko, O. Shypul, D. Samoilenko, I. Varshamova, A. Lisniak, S. Harbuz, K. Ostapov // *Electrical Engineering & Electromechanics*. – 2021. – № 1. – P. 35–43. DOI: 10.20998/2074-272X.2021.1.06. **Scopus, Q4**

Монографії (розділи у колективних монографіях):

32. Дисперсне компонування при фінішному обробленні детонувальними газовими сумішами : монографія / Ю. Стоян, С. Планковський, О. Шипуль [та ін.]. – Київ : Наукова думка, 2021. – 171 с.

33. Advanced thermal energy method for finishing precision parts / S. Plankovskyy, V. Popov, O. Shypul [et al.] // *Advanced Machining and Finishing* / ed. by A. Pramanik, K. Gupta. – Amsterdam : Elsevier, 2021. – P. 527–575. DOI: 10.1016/B978-0-12-817452-4.00014-2. **Scopus**

Патенти на винахід, що пройшли кваліфікаційну експертизу:

34. Пат. 125380 Україна, МПК(2022.01) B01F 3/02 (2006.01), B01F 13/00, G05D 11/00. Спосіб генерації газової суміші / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, С. О. Заклінський, Г. С. Тевзадзе. – № а201810303 ; заявл. 17.10.2018 ; опубл. 02.03.2022, Бюл. № 9. – 4 с.

35. Пат. 94196 Україна, МПК(2011.01) F02D 19/00, F02M 21/00, F23N 01/00. Спосіб дозування компонентів суміші в імпульсному тепловому двигуні / С. О. Мазніченко, С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов – № а201007632 ; заявл. 18.06.2010 ; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7. – 2 с.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

36. Shypul O. Modern methods of finishing edges and cleaning surfaces of metal parts / O. Shypul // Abstracts Book of 10th International Engineering Symposium at Bánki. IESB'2018 : Nov. 21, 2018 / Óbuda University. – Budapest, 2018. – P. 71.

37. Планковський С. І. Моделювання генератора паливної суміші термоімпульсної установки / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський // Новые технологии в машиностроении : материалы XXIX Междунар. конф., [Коблево], 3–8 сент. 2019 г. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т» [и др.]. – Харьков, 2019. – С. 94.

38. Планковський С. І. Застосування методу еквівалентної камери при розрахунку теплових потоків у процесах детонаційної обробки / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський // Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання : тези доп. XVII Міжнар. наук.-техн. конф., [Харків], 7–11 жовт. 2019 р. / Ін-т проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України. – Харків, 2019. – С. 8–9.

39. Maxwell B. Numerical simulation of compression and detonation strokes in a pulse compression detonation system Numerical simulation of compression and detonation strokes in a pulse compression detonation system / B. Maxwell, K. Korytchenko, O. Shypul // Advances in Design, Simulation and Manufacturing III : proc. 3rd Intern. conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange. DSMIE'2020, 9–12 June 2020, Kharkiv, Ukraine. – Cham : Springer, 2020. – Vol. 2. – P. 169–178. – (Lecture Notes in Mechanical Engineering. LNME, ISSN 2195-4356). DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5_17.

Scopus

40. Numerical simulations of mixture formation to ensuring the quality of thermal deburring / S. Plankovskyy, O. Shypul, Y. Tsegelnyk [et al.] // Advances in Mechanical and Power Engineering : sel. papers from the 14th Intern. conf. on Advanced Mechanical and Power Engineering. CAMPE'2021, 18–21 Oct. 2021, virtual, online. – Cham : Springer, 2023. – P. 108–117. – (Lecture Notes in Mechanical Engineering. LNME, ISSN 2195-4356). DOI: 10.1007/978-3-031-18487-1_11. **Scopus**

41. Determination of the mass of gas in a reservoir at filling with a mixture component under the pressure / O. Shypul, S. Plankovskyy, S. Zaklinsky [et al.] // International Scientific and Technical Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. ICTM'2021 : proceedings, 28–29 Oct. 2021, Kharkiv, Ukraine. – Cham :

Springer, 2022. – P. 166–177. – (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS, ISSN 2367-3370 ; vol. 367). DOI: 10.1007/978-3-030-94259-5_16. **Scopus**

42. Development of a digital twin of reservoir filling by gas mixture component / O. Shypul, V. Garin, D. Tkachenko [et al.] // Mathematical Modeling and Simulation : sel. papers from the 17th Intern. conf. on Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS'2022 : proceedings, 14–16 Nov. 2022, Chernihiv, Ukraine. – Cham : Springer, 2023. – P. 85–98. – (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS, ISSN 2367-3370 ; vol. 667). DOI: 10.1007/978-3-031-30251-0_7. **Scopus**

43. Balance layout problem with the optimized distances between objects / S. Plankovskyy, A. Nikolaev, O. Shypul [et al.] // Data Analysis and Optimization for Engineering and Computing Problems : proc. of the 3rd EAI Intern. conf. on Computer Science and Engineering and Health Services. COMPSE'2019, 28–29 Nov. 2019, Mexico. – Cham : Springer, 2020. – P. 85–93. – (EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. EAISICC, ISSN 2522-8595). DOI: 10.1007/978-3-030-48149-0_7. **Scopus**

44. Amplification of heat transfer by shock waves for Thermal Energy Method / S. Plankovskyy, O. Shypul, Y. Tsegelnyk [et al.] // International Scientific and Technical Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – Synergetic Engineering. ICTM'2020 : proceedings, 29–30 Oct. 2020, Kharkiv, Ukraine. – Cham : Springer, 2021. – P. 577–587. – (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS, ISSN 2367-3370 ; vol. 188). DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_49. **Scopus**

45. Circular layout in thermal deburring / S. Plankovskyy, O. Shypul, Y. Tsegelnyk [et al.] // Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS'2020 : sel. papers of 15th Intern. sci.-pract. conf., 2020 June 29 – July 01, Chernihiv, Ukraine. – Cham : Springer, 2021. – P. 111–120. – (Advances in Intelligent Systems and Computing. AISC, ISSN 2194-5357 ; vol. 1265). DOI: 10.1007/978-3-030-58124-4_11. **Scopus**

46. Планковский С. И. Разработка методики определения термонапряженного состояния деталей при термоимпульсной обработке / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, Е. В. Цегельник // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ'2017 : тези доп. Всеукр. наук.-техн. конф. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2017. – Т. 1. – С. 31–32.

47. Система ЧПУ для автоматизированного комплекса прецизионной термоимпульсной обработки / С. И. Планковский, О. В. Шипуль [и др.] // Космические технологии: настоящее и будущее : тез. докл. VII Междунар. конф., 21–24 мая 2019 г. / Гос. предпр. «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля». – Днепр, 2019. – С. 89.

48. Experimental setup with stand-alone automatic modular logger of parameters of thermal pulse processing / O. Shypul, O. Pavlenko, Y. Aksonov [et al.] // International Scientific and Technical Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. ICTM'2022 : proceedings, 28–29 Oct. 2022, Kharkiv, Ukraine. – Cham : Springer, 2023. – P. 16–28. – (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS, ISSN 2367-3370 ; vol. 657). DOI: 10.1007/978-3-031-36201-9_2. **Scopus**

49. Investigation of the electrical parameters of an advanced high-energy ignition

system / K. Korytchenko, M. Janda, O. Shypul [et al.] // Smart Technologies in Urban Engineering : proc. Intern. conf. on Smart Technologies in Urban Engineering. STUE'2022, 9–11 June 2022, Kharkiv, Ukraine. – Cham : Springer, 2023. – P. 177–188. – (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS, ISSN 2367-3370 ; vol. 536). – DOI: 10.1007/978-3-031-20141-7_17. **Scopus**

50. Дослідження клапана керованого випуску продуктів згорання автоматизованого комплексу для прецизійної термоімпульсної обробки / О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, Є. О. Аксьонов [та ін.] // XXIV Міжнародний конгрес двигунобудівників : тези доп. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т» [та ін.]. – Харків, 2019. – С. 104–105.

51. Optical and electrical investigation of plasma generated by high-energy self-stabilized spark ignition system / M. Janda, K. Korytchenko, O. Shypul [et al.] // 9th Central European Symposium on Plasma Chemistry (CESPC-9) joint with COST Action CA19110 Plasma Applications for Smart and Sustainable Agriculture (PIAgri) : book of abstr., 4–9 Sept. 2022, Vysoké Tatry, Slovakia. – Bratislava, 2022. – P. 41.

52. Permanent magnet synchronous generator stabilization system with induction motor in ANSYS Twin Builder / V. Pliuhin, V. Herasymenko, O. Shypul [et al.] // Smart Technologies in Urban Engineering : proc. 2nd Intern. conf. on Smart Technologies in Urban Engineering. STUE'2023, 8–10 June 2023, virtual, online. – Cham : Springer, 2023. – P. 258–270. – (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS, ISSN 2367-3370 ; vol. 808). DOI: 10.1007/978-3-031-46877-3_23. **Scopus**

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації:

53. Sparse 2D packing in thermal deburring with shock waves acting effects / S. Plankovsky, T. Romanova, O. Shypul [et al.] // Human Assisted Intelligent Computing: Modelling, simulations and applications / ed. by M. S. Manshahia [et al.]. – Bristol : IOP Publishing, 2023. – Chap. 13. – P. 1–20. DOI: 10.1088/978-0-7503-4801-0ch13. **Scopus**

54. Basic principles for thermoplastic parts finishing with Impulse Thermal Energy Method / S. Plankovsky, O. Shypul, Y. Tsegelnyk [et al.] // Handbook of Research on Advancements in the Processing, Characterization, and Application of Lightweight Materials / ed. by K. Kumar [et al.]. – Hershey : IGI Global, 2022. – P. 49–87. DOI: 10.4018/978-1-7998-7864-3.ch003.

55. Розроблення автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами: наукові матеріали : монографія / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, Є. В. Цегельник [та ін.] ; за ред. С. І. Планковського. – Харків : ХАІ, 2020. – 318 с.

56. Сучасні методи фінішного очищення інтенсивними потоками енергії : монографія / О. В. Шипуль, Є. В. Цегельник [та ін.]. – Харків : ХАІ, 2013. – 189 с.

57. Пат. 146262 Україна, МПК(2006) B01F 3/00. Спосіб приготування газової суміші заданого складу / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров, Г. С. Тевзадзе, В. О. Гарін. – № u202005803 ; заявл. 10.09.2020 ; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5. – 4 с.

58. Пат. 146263 Україна, МПК(2006) B01F 3/00. Спосіб приготування газової суміші заданого складу / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров, Є. О. Аксьонов. – № u202005803 ; заявл. 10.09.2020 ; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5. – 4 с.

59. Пат. 131497 Україна, МПК(2006.01) B23K 7/06. Спосіб термічного видалення ліквідів / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, С. О. Заклінський, Г. С. Тевзадзе. – № a201807337 ; заявл. 02.07.2018 ; опубл. 25.01.2019, Бюл. № 2. – 4 с.

60. Пат. 133161 Україна, МПК(2006.01) B23K 7/06. Спосіб термічного видалення ліквідів / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, С. О. Заклінський. – № u201810404 ; заявл. 22.10.2018 ; опубл. 25.03.2019, Бюл. № 6. – 4 с.

АНОТАЦІЯ

Шипуль О. В. Наукові основи прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки. – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, 2024.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науко-технічної проблеми комплексної автоматизації проектування технології й обладнання фінішного прецизійного оброблення продуктами згоряння газових сумішей на основі математичного моделювання процесів фізико-технічного оброблення матеріалів і науково обґрунтованих технічних рішень виконавчих систем обладнання. Актуальність роботи зумовлена тим, що основною перешкодою інтеграції до кола сучасного виробництва фінішних технологій, які реалізують термоенергетичні методи оброблення з доведеними унікальними високоефективними можливостями, є відсутність достовірних методів і методик автоматизованого призначення технологічних режимів, які мають точно враховувати закономірності стану складного об'єкта (або групи об'єктів), оброблення під дією ланцюга пов'язаних і взаємовпливових швидкоплинних процесів газодинамічної течії хімічно-реагуювальних газових сумішей і процесів теплообміну, а визначення таких закономірностей, своєю чергою, є актуальною проблемою фізико-технічного оброблення.

В роботі розроблено комплексні математичні моделі, які описують робочі процеси під час термоімпульсного оброблення, зокрема генерації паливної суміші, ініціації згоряння, горіння за різними режимами й керованого випускання продуктів згоряння, і введено критерії, які забезпечують визначення показників прецизійності оброблення. Проведено комплексну верифікацію розроблених моделей; похибка порівняно з експериментальними даними становить від 0,5 до 6%.

Сформульовано й вирішено задачі найбільш розрідженого балансного компонування групи деталей і оптимального позиціонування деталі складної форми під

час термоімпульсного оброблення. Розроблено алгоритмічне забезпечення для розв'язання сформульованих задач для базових геометричних примітивів і їхніх композицій із використанням апарату *phi*-функцій.

Запропоновано методику призначення режимів термоімпульсного зачищення крайок за кваліметричними показниками, ураховуючи міцнісні обмеження.

Установлено вимоги до точності дозування компонент паливної суміші й часу термоімпульсного оброблення, ураховуючи вимоги до точності кваліметричних показників крайок, і запропоновано технічні рішення щодо способу генерації паливної суміші для термоімпульсного оброблення й обладнання для його реалізації. Спроектовано й виготовлено блок високоенергетичного іскрового запалювання з регульованою енергією іскрового розряду. Удосконалено конструкцію клапана керованого випускання продуктів згоряння з робочої камери термоімпульсної установки, що дозволило виконати вимоги до точності забезпечення часу оброблення. Розроблено й виготовлено модульний автономний автоматичний реєстратор експериментальних даних, який не потребує з'єднання зі зовнішньою вимірювальною апаратурою. Розроблено методику побудови цифрових близнюків для управління й моніторингу роботи автоматизованого обладнання термоімпульсного оброблення газовими сумішами. Розроблено й виготовлено систему автоматизованого числового керування процесів прецизійного термоімпульсного обладнання. Розроблені моделі, алгоритми й технічні рішення для систем термоімпульсного обладнання й системи ЧПК дозволяють забезпечити встановлені вимоги щодо точності генерації суміші, часу оброблення й стабільності цих параметрів за циклічної роботи.

Наслідком проведених у дисертаційній роботі комплексних теоретичних і експериментальних досліджень є розроблені наукові основи прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами, які полягають у створенні нового інструментарію для комплексної автоматизації проектування технології й обладнання фінішного прецизійного оброблення продуктами згоряння газових сумішей.

Ключові слова: автоматизація, прецизійне термоімпульсне оброблення, математичні моделі, балансне компонування, генерація паливної суміші, детонаційне згоряння, теплові потоки.

ABSTRACT

Shypul O. V. Scientific basis of the precision thermal pulse processing with detonating gas mixtures. – Scientific study on the rights of manuscript.

Dissertation with a view to obtaining the academic degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.03.07 – processes of physical and technical processing. – National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to an important scientific and technical problem – the complex automation design of technology and equipment for the precision finishing with detonable gas mixture based on mathematical modeling of physical and technical materials processing and scientifically based technical solutions of executive equipment systems.

The complex of mathematical models that describe fuel mixture generation, ignition of combustion, combustion in different modes, and controlled release of combustion products was developed and verified, and the criteria were introduced that ensure the determined processing precision indicators. The problems of the rarest balanced composition and the optimal positioning of parts were solved and the algorithmic support was developed. The method of assigning modes for thermal pulse finishing according to qualitative parameters and strength limitations is proposed. A high-energy spark ignition unit was designed and manufactured. The valve for the controlled release of combustion products was improved. A modular autonomous automatic experimental data recorder was developed and manufactured. A system of automated numerical control with digital twins for precision thermal pulse equipment was developed and manufactured.

Keywords: automation, precision thermal pulse processing, mathematical models, balanced composition, fuel mixture generation, detonation combustion, heat flux.

Підписано до друку 07.05.2024
Формат 60×90/16. Папір офс. Офс. друк
Ум. друк. арк. 2,4. Наклад 100 пр. Замовлення № 75-24

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, м. Харків-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр «ХАІ»
61070, м. Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001