*Козіс Кристина Вікторівна, провідний інженер ДП &laquo;Конструкторське бюро &laquo;Південне&raquo; імені М. К. Янгеля&raquo;: &laquo;Інформаційні візуально-аналітичні технології розроб&shy;ки і контролю теплозахисних покриттів твердопаливних ракетних двигунів&raquo; (05.13.06 - інформаційні технології). Спецрада К 08.051.01 у Дніпровському національному уні&shy;верситеті імені Олеся Гончара МОН України*

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»

Державне космічне агентство України  
Дніпровський національний університет імені Олеся Г ончара  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

**Козіс Кристина Вікторівна**

Прим №

УДК 621.454.3:629.7.023.224

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНФОРМАЦІЙНІ ВІЗУАЛЬНО-АНАЛІТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
РОЗРОБКИ І КОНТРОЛЮ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ  
ТВЕРДОПАЛИВНИХ РАКЕТНИХ ДВИГУНІВ**05.13.06 - інформаційні технології  
05 ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і  
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Науковий керівник - **Манько Тамара Антонівна**, доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2019

ЗМІСТ

[ВСТУП 18](#bookmark3)

РОЗ ДІЛ 1. Аналіз сучасного стану технологій розробок внутрішніх теплозахисних покриттів твердопаливних ракетних двигунів 24

1. Стан технологій розробок ракетних двигунів твердого

палива 24

1. Внутрішній тепловий захист корпусу ракетного двигуна твердого

палива 30

1. Науково-технічні задачі технології розроблення теплозахисних покриттів

ракетних твердопаливних двигунів 36

[Висновки до першого розділу 40](#bookmark10)

РОЗ ДІЛ 2. Матеріали, методики досліджень та методи неруйнівного 41

контролю

1. Матеріали кріпильного шару 41
2. [Матеріали бар'єрного й герметизуючого (основного) шарів 44](#bookmark11)
3. [Матеріали адгезійного шару 48](#bookmark12)
4. Методи фізико-механічних, теплофізичних випробувань і контролю

зразків та модельних виробів теплозахисних

покриттів 50

1. Інформаційні технології досліджень матеріалів теплозахисних

покриттів 51

1. [Методи неруйнівного контролю теплозахисних покриттів 54](#bookmark15)

[Висновки до другого розділу 55](#bookmark16)

РОЗ ДІЛ 3. Експериментальні інформаційні технології дослідження

внутрішніх теплозахисних покриттів ракетних двигунів твердого

палива 56

1. Склад та вимоги до внутрішнього теплозахисного покриття 56
2. Дослідження захисно-кріпильного шару внутрішнього теплозахисного

покриття 57

1. Дослідження герметизуючого (основного) шару внутрішнього

теплозахисного покриття 62

[3.4. Оцінка температури руйнування герметизуючого (основного) шару 70](#bookmark20)

[Висновки до третього розділу 78](#bookmark21)

[РОЗ ДІЛ 4. Технологія створення внутрішнього теплозахисного покриття корпусу ракетного твердопаливного двигуна 80](#bookmark22)

1. Підготовка створення теплозахисного покриття 80
2. Технологія розробки внутрішнього теплозахисного покриття корпусу

ракетного двигуна твердого палива 83

1. Технологія та контроль з'єднання внутрішнього теплозахисного покриття

з силовою оболонкою корпусу 88

1. Дослідження та контроль з'єднання внутрішнє теплозахисне покриття -

силова оболонка корпусу ракетного твердопаливного

двигуна 98

[Висновки до четвертого розділу 108](#bookmark25)

РОЗ ДІЛ 5. Візуально-аналітична обробка цифрових зображень внутрішніх теплозахисних покриттів 110

1. Постановка завдання і методи обробки цифрових зображень 110
2. Візуальний аналіз експериментальних цифрових зображень внутрішнього

теплозахисного покриття твердопаливного двигуна 113

1. Теоретичні основи комп'ютерної обробки цифрових зображень

теплозахисних покриттів 126

1. Візуально-аналітичний аналіз результатів комп'ютерної обробки

вимірювань цифрових зображень 129

1. Результати обробки цифрових зображень теплозахисних покриттів після

статичних випробувань корпусу ракетного двигуна 138

[Висновки до п'ятого розділу 142](#bookmark33)

ВИСНОВКИ 143

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 146

ДОДАТОК А. Список наукових праць за темою дисертаційної роботи 158

ДОДАТОК Б. Акт впровадження наукових та практичних результатів

досліджень у виробничий процес ДП «КБ «Південне» імені М.К. Янгеля 163

ДОДАТОК В. Акт впровадження наукових та практичних результатів

досліджень у виробничий процес ДП «УНДКТІ «ДІНТЄМ» 164

ДОДАТОК Г. Акт реалізації наукових та практичних результатів у навчальний процес ФТФ Дніпровського національного університету імені Олеся Г ончара 165

**ВСТУП**

**Актуальність теми.** Одна з особливостей ракетної техніки - високий темп ускладнення і оновлення конструкцій у зв'язку з тактико-технічними вимогами до них та використанням нових матеріалів з більш високими властивостями. Вирішення усієї сукупності завдань під час проектування, створення й експлуатації ракетно-космічної техніки неможливо без широкого розвитку та впровадження нових інформаційних технологій розробки, виготовлення та контролю.

Найпоширеніші і найскладніші конструкції сучасної техніки - це ракетні двигуни твердого палива (РДТП) з полімерних композиційних матеріалів. Під час їх створення одним з основних завдань є розробка і контроль із застосуванням інформаційних технологій обробки вимірювань, які містять інформацію, що дозволяє підвищити якість внутрішнього теплозахисного покриття (ВТЗП) корпусу ракетного двигуна твердого палива [1-4].

Дисертаційні дослідження направлені на рішення актуальної науково -технічної задачі ракетно-космічної техніки.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Науково- дослідні роботи і технологічне відпрацювання створення багатошарової системи внутрішнього теплозахисного покриття корпусу ракетного двигуна твердого палива було виконано в рамках проекту «ГРОМ-2» відповідно до Контракту № YN-KACST-13061.

**Мета дослідження.** Розроблення інформаційних технологій для побудови і випробування автоматизованих методів технічного контролю та діагностування внутрішніх теплозахисних покриттів корпусів ракетних двигунів твердого палива.

**Задачі досліджень:**

1. Провести науково-технічний аналіз створення інформаційних технологій, які супроводжують розробку, контроль та діагностування внутрішніх теплозахисних покриттів ракетних двигунів твердого палива.
2. Розробити інформаційну технологію відбору матеріалів для створення багатошарових теплозахисних покриттів та технологію експериментальної оцінки їх характеристик, що забезпечують працездатність ракетних двигунів твердого палива.
3. Розробити інформаційну технологію створення та контролю багатошарового внутрішнього теплозахисного покриття.
4. Розробити інформаційну технологію оцінки якості з'єднання багатошарового внутрішнього теплозахисного покриття з силовою оболонкою корпусу ракетного двигуна.
5. Обґрунтувати інформаційну технологію неруйнівного візуально - аналітичного контролю стану поверхні внутрішнього теплозахисного покриття шляхом обробки його цифрових зображень.

**Об’єкт дослідження** - процеси високотемпературного теплового впливу на матеріали внутрішнього теплозахисного покриття ракетного двигуна твердого палива.

**Предмет дослідження** - інформаційні технології контролю багатошарових внутрішніх теплозахисних покриттів корпусів ракетних двигунів твердого палива й оцінка їх працездатності.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань було використано теоретичні й експериментальні інформаційні технології досліджень матеріалів та оцінки їх характеристик за розробленими методиками й експериментальними даними на випробувальному устаткуванні. Це визначення фізико-механічних характеристик (руйнівне напруження, відносне подовження під час розриву, залишкова деформація, руйнівне напруження під час рівномірного поперечного відриву) і теплофізичних властивостей матеріалів (питома теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, температура руйнування), інформаційні технології дериватографічного аналізу, електронної мікроскопії, інфрачервоної спектроскопії, візуально-аналітичний метод обробки й аналізу цифрових зображень поверхонь внутрішніх теплозахисних покриттів. Для обробки результатів досліджень було використано сучасне програмне забезпечення.

Експериментальні дослідження проведено на сучасному науково-дослідному устаткуванні ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, ДП «Український науково-дослідний конструкторсько-технологічний інститут еластомерних матеріалів і виробів», м. Дніпро, Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ, Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля, м. Київ.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У результаті виконаних досліджень одержано нові наукові результати:

1. Вперше проведено комплексне інформаційне дослідження умов працездатності внутрішнього теплозахисного покриття ракетного двигуна твердого палива, що дозволило обґрунтувати його багатошарову структуру, вимоги до фізико-механічних та теплофізичних характеристик матеріалів його створення.
2. Вперше за допомогою інформаційних технологій експериментальних досліджень матеріалів і оцінки їх якості для внутрішнього теплозахисного покриття були відібрані технічні тканини, каландрована гумова суміш для захисно - кріпильного і герметизуючого (основного) шарів, а також клейові і тканинні матеріали для з'єднання теплозахисного покриття з силовою оболонкою корпусу і визначено їх основні характеристики.
3. Вперше застосована інформаційна технологія неруйнівного контролю властивостей тканинних матеріалів з метою збільшення адгезійної міцності внутрішнього теплозахисного покриття з силовою оболонкою корпусу ракетного двигуна твердого палива. Установлено, що найбільшу високу адгезійну міцність покриття забезпечує використання бавовняної тканини з некручених ниток перкаль, просоченої епоксидною системою Araldite LY 1135-1/Aradur 917/Лссе1егаїог 960-1 HUNTSMAN.
4. Вперше із застосуванням інформаційної технології інфрачервоної спектроскопії досліджено стан приграничних зон з’єднання внутрішнього теплозахисного покриття з силовою оболонкою корпусу і встановлено, що інфрачервоний спектр з боку внутрішнього теплозахисного покриття в структурі «внутрішнє теплозахисне покриття - бавовняна тканина із некручених ниток перкаль та епоксидний вуглепластик» аналогічний інфрачервоному спектру гумової суміші на основі етиленпропіленового каучуку, який гарантує високу адгезійну міцність з'єднання.
5. Вперше запропоновано інформаційну візуально-аналітичну технологію неруйнівного контролю теплозахисних покриттів ракетних двигунів твердого палива шляхом аналізу результатів статистичної обробки цифрових зображень їх поверхонь, які недоступні до спостереження.

**Практичне значення одержаних результатів**

1. Результати дисертаційних досліджень використано на ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля» під час проектування та виготовлення твердопаливних ракетних двигунів з полімерних композиційних матеріалів ОТР «ГРОМ-2»: розроблена і реалізована інформаційна технологія візуально-аналітичного контролю стану внутрішніх теплозахисних покриттів 14 корпусів демонстраційних ракетних двигунів твердого палива ОТР «ГРОМ-2».
2. Візуально-аналітичний контроль забезпечив герметичність, ерозійну стійкість і стабільність геометричних параметрів теплозахисного покриття корпусу ракетного двигуна твердого палива шляхом оцінки компенсації термічного розширення матеріалів під час його одночасної вулканізації й полімеризації силової оболонки (патент України на корисну модель № 125202 «Спосіб формування внутрішнього теплозахисного покриття корпусу ракетного двигуна твердого палива із композиційних матеріалів» МПК F02K 9/34 (2006.01) / О.М. Потапов, К.В. Козіс, С.В. Федоренко, Т.А. Манько; заявник та власник ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля; заяв. 07.07.17; опуб. 10.05.2018, Бюл. № 9. - 7с.:іл.).
3. Вибір та візуально-аналітичний контроль адгезійного шару бавовняної тканини з некручених ниток перкаль, просоченої епоксидною системою Araldite LY 1135-1/Aradur 917/Accеlerator 960-1 HUNTSMAN, забезпечили високу міцність з'єднання внутрішнього теплозахисного покриття з силовою оболонкою корпусу ракетного двигуна твердого палива.
4. Вогневі випробування на ДП «Павлоградський механічний завод» підтвердили достовірність прийнятих по результатам візуального-аналітичного контролю рішень про працездатність розроблених внутрішніх теплозахисних покриттів корпусів ракетних двигунів твердого палива ОТР «ГРОМ-2» відповідно до 00.6061.0000.0000.00.0 ТУ «Маршевый двигатель. Технические условия».

Одержані науково-практичні результати використані на ДП «Український науково-дослідний конструкторсько-технологічний інститут еластомерних матеріалів і виробів» для вдосконалення інформаційної технології контролю технологічного процесу виготовлення внутрішнього теплозахисного покриття днищ з метою збільшення ступеня герметичності корпусу ракетного двигуна твердого палива.

Результати дисертаційних досліджень використовуються під час проведення лекційних, практичних та лабораторних занять відповідно до навчальних планів на фізико-технічному факультеті Дніпровського національного університету імені Олеся Г ончара.

Про практичне застосування одержаних в дисертаційній роботі наукових результатів свідчать відповідні акти про їх впровадження. Акти наведено у Додатках.

**Особистий внесок автора.** Здобувачем на підставі вивчення й аналізу літературних джерел дослідження та виготовлення теплозахисту корпусів твердопаливних ракетних двигунів установлено основні вимоги до інформаційних технологій розробки та контролю теплозахисного покриття і матеріалів його створення.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить експериментально-теоретичне обґрунтування вибору матеріалів вітчизняного виробництва для створення внутрішніх теплозахисних покриттів; удосконалено технологію їх виготовлення; запропоновано спосіб з'єднання внутрішнього теплозахисного покриття з силовою оболонкою корпусу за допомогою тканинних матеріалів і розроблена інформаційна технологія візуально-аналітичного неруйнівного контролю шляхом комп'ютерної обробки цифрових зображень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних конференціях і семінарах: П'ятій технічній

конференції українського відділення SAMPE «Результати дослідження нових процесів, матеріалів виробів. Методи контролю» (м. Київ, 2015 р.), Шостій технічній конференції українського відділення SAMPE «Управління авіаційним виробництвом у перехідний період» (м. Київ, 2016 р.), XII-й Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості й освіті (м. Варна, 2016 р.), IV-ому Всеукраїнському форумі студентів, аспірантів і молодих учених (м. Дніпро, 2017 р.), Міжнародній науково- технічній конференції «Інформаційні технології в металургії й машинобудуванні» (м. Дніпро, 2017 р.), 77-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, 2017 р.),

XIII-й Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості й освіті» (м. Варна, 2017 р.), Шостій міжнародній конференції «Космічні технології: сучасне та майбутнє» (м. Дніпро, 2017 р.), Сьомій технічній конференції українського відділення SAMPE «Керування авіаційним виробництвом у перехідний період» (м. Київ, 2017 р.), XVII - ХХ-х міжнародних молодіжних науково-практичних конференціях «Людина і Космос» (м. Дніпро, 2015 - 2018 рр.).

За доповіді на XVIII - ХХ-х міжнародних молодіжних науково-практичних конференціях «Людина і Космос» здобувача було нагороджено дипломами за кращу доповідь.

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 18 наукових праць, з них 9 статей у фахових виданнях України з технічних наук, у тому числі 7 статей у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних; 1 стаття у колективній монографії; 7 публікацій в матеріалах конференцій; один патент України на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 110 найменувань і чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 165 сторінок, що містить 128 сторінок основного тексту, 64 рисунки та 29 таблиць.

**ВИСНОВКИ**

У результаті дисертаційних досліджень, виконаних автором, вирішено важливе науково-технічне завдання створення інформаційних технологій розробки та контролю внутрішнього теплозахисного покриття для корпусу ракетного двигуна твердого палива.

Наукові результати дисертаційних досліджень полягають в наступному

1. Працездатність розроблюваних ракетних двигунів нового покоління з композиційних матеріалів, корпуси яких повинні витримувати високі теплові навантаження, не може бути забезпечена відомими внутрішніми теплозахисними покриттями. Для його створення відібрані технічні тканини, каландрована гумова суміш для захисно-кріпильного і герметизуючого (основного) шарів, а також клейові і тканинні матеріали для з’єднання внутрішнього теплозахисного покриття з силовою оболонкою корпусу.
2. Запропоновано нові інформаційні технології експериментальних досліджень матеріалів і конструкцій для оцінки їх якості, за допомогою яких вперше визначено основні характеристики захисно-кріпильного, герметизуючого (основного), адгезійного шарів теплозахисного покриття.
3. По результатам інформаційного дериватографічного аналізу та експериментального руйнівного напруження під час рівномірного поперечного відриву встановлено, що для захисно-кріпильного шару перспективним є застосування полотна високоеластичного поліамідного (ПВП-У) виробництва «КиївНДІТГП» (Україна). При застосуванні полотна високоеластичного поліамідного та каландрованої гумової суміші 1001 установлено, міцність під час рівномірного поперечного відриву має порядок (1,38^1,94) МПа, що свідчить про високу ефективність захисно-кріпильного шару. Температура його деструкції складає +470°С.
4. Інформаційна технологія визначення температури руйнування використана для експериментального дослідження теплофізичних властивостей матеріалу герметизуючого (основного) шару - каландрованої гумової суміші 1001 у широкому інтервалі температур. Установлено, що в умовах конвективного нагрівання його тепловим потоком, який відповідає швидкості газового потоку під час згоряння твердого палива, при підвищенні температури робочої поверхні шару до +200°С, каландрована гумова суміш 1001 протягом 90 секунд не виявляє видимих ознак руйнування, що забезпечує достатній рівень теплової ізоляції під час експлуатації ракетного твердопаливного двигуна.
5. По результатам інформаційно-вимірювальної технології руйнівного напруження адгезійного шару доведено, що традиційні матеріали (клеї та зв’язуючи) не забезпечують якісного з’єднання внутрішнього теплозахисного покриття з силовою оболонкою корпусу при виготовленні ракетного двигуна твердого палива. Вперше з метою збільшення адгезійної міцності з'єднання внутрішнього теплозахисного покриття з силовою оболонкою корпусу запропоновано використання тканинних матеріалів. Встановлено, що їх високу адгезійну міцність забезпечує використання бавовняної тканини із некручених ниток перкаль, просоченої епоксидною системою Araldite LY 1135-1/ Aradur 917/ Accelerator 960-1 HUNTSMAN.
6. Інформаційна технологія електронної мікроскопії використана для дослідження приграничної зони з'єднання внутрішнього теплозахисного покриття з силовою оболонкою корпусу і виявлення структурних змін в них. Встановлено механізм формування впорядкованих надмолекулярних утворень у випадку застосування бавовняної тканини із некручених ниток перкаль, просоченої епоксидною системою, структура яких характеризується як кластери.
7. Вперше з використанням інформаційної технології інфрачервоної спектроскопії досліджено адгезійну міцність приграничних зон з'єднання внутрішнього теплозахисного покриття з силовою оболонкою корпусу. Установлено, що інфрачервоний спектр з боку внутрішнього теплозахисного покриття в структурі «внутрішнє теплозахисне покриття - бавовняна тканина перкаль - епоксидний вуглепластик» аналогічний інфрачервоному спектру гумової суміші на основі етиленпропіленового каучуку, який гарантує високу адгезійну міцність.
8. Вперше розроблено нове технічне рішення, яке дозволяє компенсувати термічні розширення матеріалів і вдосконалити технологію виготовлення внутрішнього теплозахисного покриття днищ під час виготовлення корпусу ракетного двигуна твердого палива (патент України на корисну модель № 125202). Таке технічне рішення гарантує виготовлення корпусів ракетних двигунів твердого палива з більш високими експлуатаційними параметрами.
9. Вперше для контролю стану розроблюваних теплозахисних покриттів запропоновано і реалізовано інформаційну візуально-аналітичну технологію неруйнівного контролю шляхом розгляду й статистичного аналізу вимірювань цифрових зображень поверхні теплозахисного покриття. Висновки візуального розгляду і класифікація цифрових зображень підтверджуються шляхом статистичної обробки матриць вимірювань цифрових зображень, оцінками та порівнянням їх параметрів (середніх значень яскравості, розкиду вимірювань і їх гістограм). Проведено оцінку стану теплозахисного покриття після його випробувань шляхом силового навантаження корпусу внутрішнім надлишковим тиском 13,0 МПа. Візуальний аналіз цифрових зображень і результати статистичної обробки підтвердили працездатність внутрішнього теплозахисного покриття після силових навантажень.
10. Результати поданих досліджень використані на ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» при проектуванні й виготовленні демонстраційних ракетних двигунів твердого палива ОТР «ГРОМ-2». Проведення вогневих випробувань на ДП «Павлоградський механічний завод» підтвердило працездатність внутрішніх теплозахисних покриттів корпусів ракетних двигунів твердого палива ОТР «ГРОМ-2» згідно з 00.6061.0000.0000.00.0 ТУ «Маршевый двигатель. Технические условия». Результати наукових досліджень використані також в учбовому процесі фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Г ончара.