



МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ РАКЕТНОЇ І АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

**Робота на здобуття
Національної премії України імені Бориса Патона**



Автори

СУХИЙ Костянтин Михайлович – доктор технічних наук, професор, член-кореспондент Національної академії наук України, в.о. ректора Українського державного університету науки і технологій

ЗАЙЧУК Олександр Вікторович – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи Українського державного університету науки і технологій

ОВЧИННИКОВ Олександр Володимирович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник Українського державного університету науки і технологій

КОЖУРА Олег Вікторович – кандидат хімічних наук, доцент, докторант Українського державного університету науки і технологій

САНІН Анатолій Федорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

КУЛИК Олексій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, генеральний директор Національного центру аерокосмічної освіти молоді ім. О.М. Макарова

ГРИЦАК Дмитро Вікторович – кандидат технічних наук, Почесний працівник космічної галузі України, заступник міністра з питань цифрового розвитку, цифрової інформації та цифровізації Міністерства стратегічних галузей промисловості України

БАЛУШОК Костянтин Броніславович – кандидат технічних наук, головний інженер АТ «Мотор Січ»



Мета роботи

Аерокосмічна та авіаційна галузь будь якої країни визначає її національну і оборонну безпеку, є запорукою високого рівня життя і є невід'ємною частиною освіти, науки та економіки. З огляду на це, забезпечення реалізації в Україні, або за межами України за вітчизняними технологіями, створення авіаційної і ракетної техніки є питанням суверенітету нашої Держави.

Метою роботи є реалізація в Україні проєктних рішень, а також розробці матеріалів і технологій для створення елементів конструкцій ракетної і авіаційної техніки

В роботі представлені результати досліджень авторів в наступній хронології:

- проектування та конструювання ракетної та авіаційної техніки та матеріалів та елементів конструкцій,
- розробка інноваційних технологій отримання матеріалів та елементів конструкцій ракетної та авіаційної техніки,
- розробка матеріалів і технологій отримання компонентів твердих ракетних палив, технологій виготовлення твердопаливних двигунів,
- розробка в Україні власних суборбітальних ракет подвійного призначення.

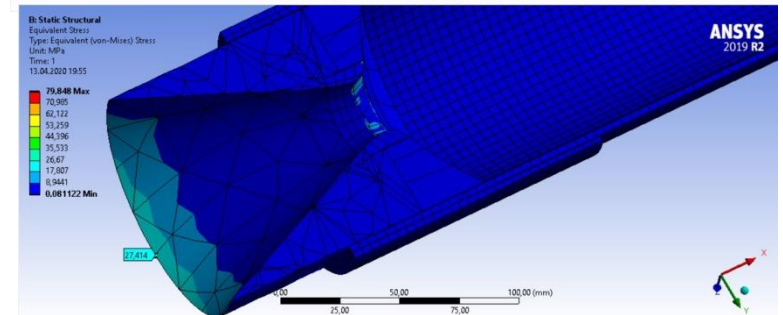
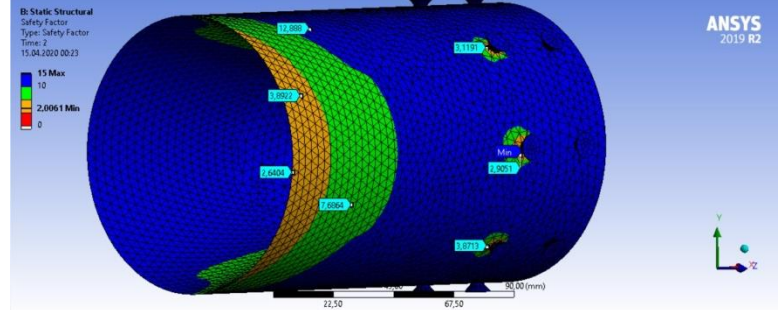
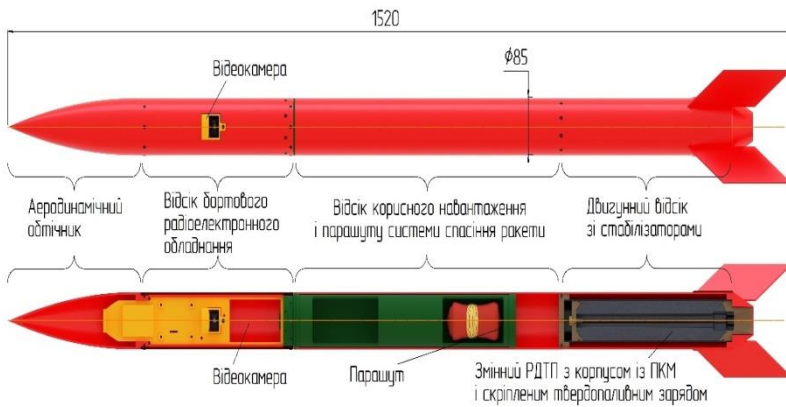


Задачі

- організація проектно-конструкторських робіт зі створення суборбітальних ракет; на базі гібридного асимптотичного підходу розробити нові математичні моделі, наближені аналітико-чисельні підходи та алгоритми розв'язку задач математичної фізики і механіки тонкостінних неоднорідних конструкцій, придатних на стадії проектування силових елементів систем нової техніки,
- технологічна підготовка виробництва елементів конструкцій і складання суборбітальних ракет надлегкого класу; розробка, виготовлення і впровадження у виробничий процес технологічного обладнання для виробництва елементів конструкцій з полімерних композиційних матеріалів методом намотки; максимальне використання елементів конструкцій, виготовлених способом 3D-друку;
- розробка вітчизняних технологій виробництва всіх компонентів твердих ракетних палив – порошків Al та сплавів (пальне), окисників та полімерних зв'язуючих із заданим набором властивостей; розробка вітчизняної технології електрохімічного синтезу перхлоратів лужних металів та іонообмінної технології їх перетворення в розчини перхлорату амонію; розробка вітчизняної технології виробництва перхлорату амонію кристалічного заданої чистоти, морфології та гранулометричного складу; створення технології твердопаливних двигунів,
- розробка хімічних і речовинних складів та створення фізико-хімічних основ енергозберігаючої технології виробництва вітчизняних радіопрозорих керамічних матеріалів кордієритового і цельзіанового складу з регульованою мікроструктурою і фазовим складом, які володіють комплексом спеціальних властивостей і використовуються для високоточного ракетного озброєння, зокрема для виготовлення носових антенних обтічників радіолокаційних головок самонаведення ракет різних класів,
- розроблення і удосконалення методики й технологічних прийомів термомеханічного калібрування та впровадження у виробництво нового технологічного процесу термомеханічного калібрування обичайок корпусів ракетноносіїв,
- побудова технологічної схеми замкнутого циклу виробництва елементів конструкції авіаційної та ракетної техніки на основі прогресивних адитивних технологій, від отримання титану губчатого, виплавки зливків сплавів, вироблення електродів і розпилення порошків до 3D друку готового виробу,
- комплексна практична підготовка фахівців в галузі створення і експлуатації ракетної техніки, практична підготовка висококваліфікованих кадрів в області авіаційної і ракетної техніки і ракетно-реактивного озброєння.

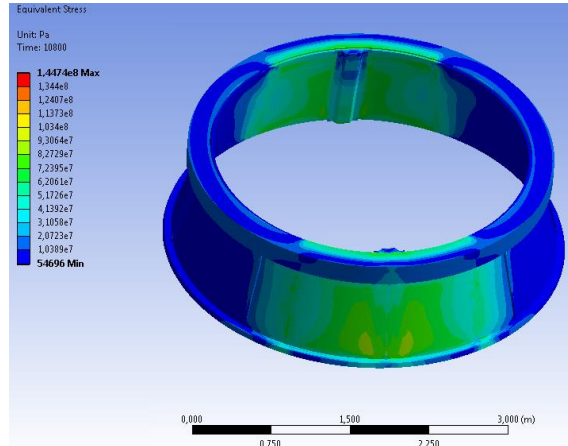


Проектування ракет, вибір компонувальних і аеродинамічних схем

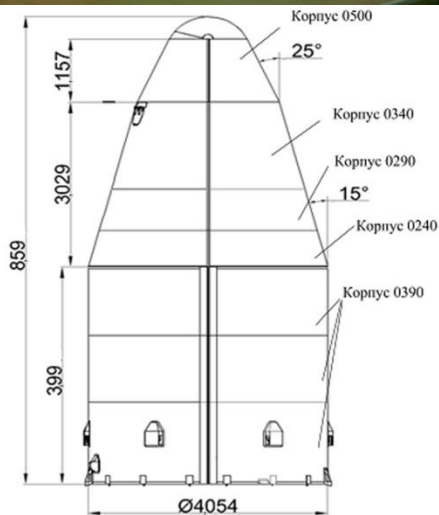




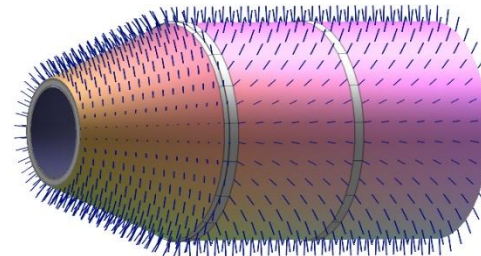
Технології забезпечення точності великогабаритних конструкцій обтічників ракет-носіїв



Еквівалентне напруження для обичайки із симетричною еліптичністю 20×10^{-3} м у момент нагрівання до 603 К



Загальний вигляд ГАО РН «Циклон-4»

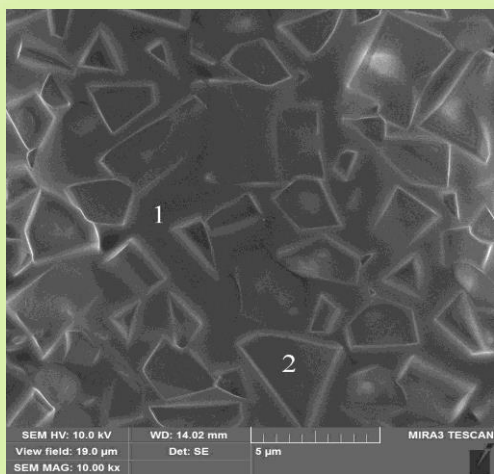


Складена багатошарова оболонкова конструкція при комбінованому навантаженні



МІКРОСТРУКТУРА І ФАЗОВИЙ СКЛАД КОРДІЄРИТОВОЇ І ЦЕЛЬЗІАНОВОЇ КЕРАМІКИ ДЛЯ НОСОВИХ АНТЕННИХ ОБТІЧНИКІВ

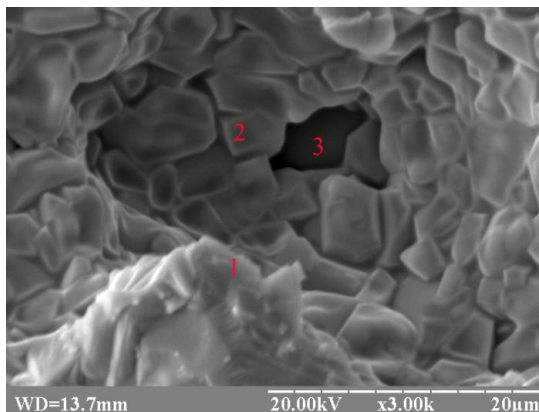
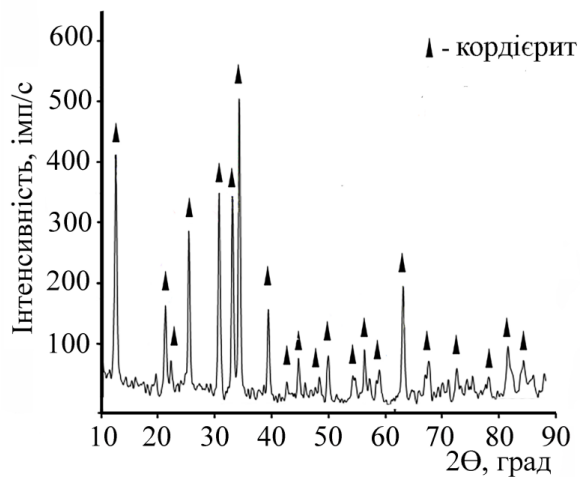
C-1(2) 1300°C



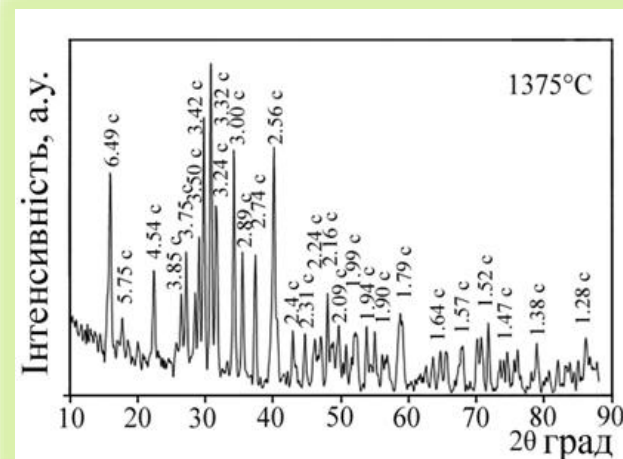
1 – склофаза; 2 – кордієрит

Властивості кераміки	Показники властивостей кераміки	
	кордієритової	цельзіанової
Температура випалу, °С	1300	1375
Межа міцності на стискання $\sigma_{ст}$, МПа	314	160
ТКЛР в діапазоні 20–400°С, град ⁻¹	$14 \cdot 10^{-7}$	$35 \cdot 10^{-7}$
Термічна стійкість θ , °С	900	750
Вогнетривкість В, °С	1350	1580
Діелектрична проникність ϵ	4,3	5,5
Тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta$	0,001	$(5-6) \cdot 10^{-4}$
Відкрита пористість П, %	0	0

C-5 1375°C



1 – склофаза; 2 – цельзіан;
3 – пора



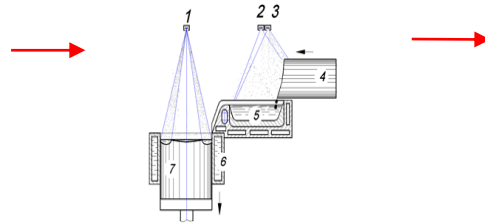
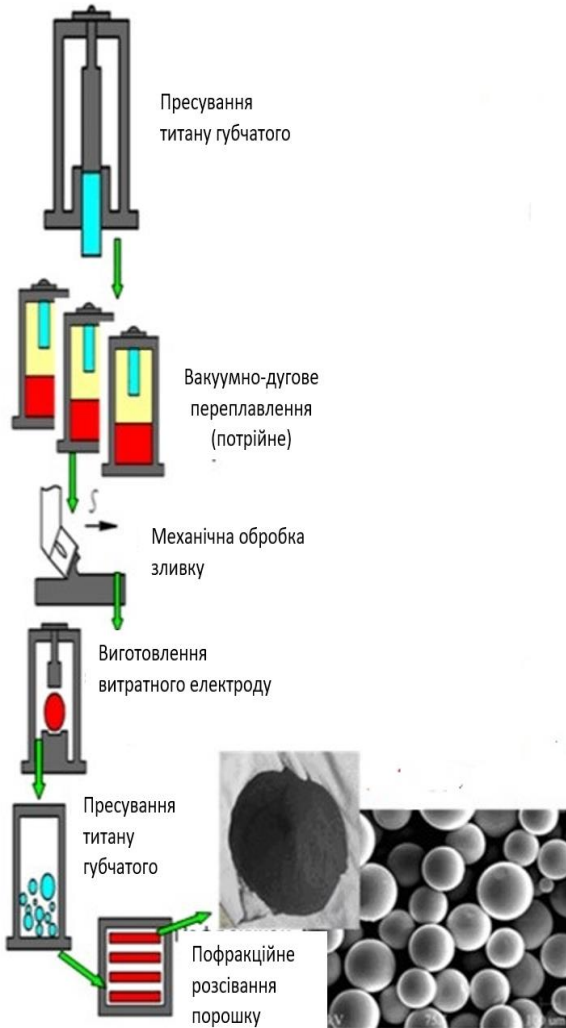


Зразки обтічників та ракетна техніка





Технології адитивного отримання виробів з металевих порошків жароміцних сплавів



Електро-промене плавлення зливок



Злилок дослідного сплаву, одержаний методом ЕПП



Зливок, виплавлений з губчатого титану, легованого алюмінієм та ванадієм



Кування виконували по схемі "квадрат-круг" з $\varnothing 106$ на $\varnothing 59$ мм



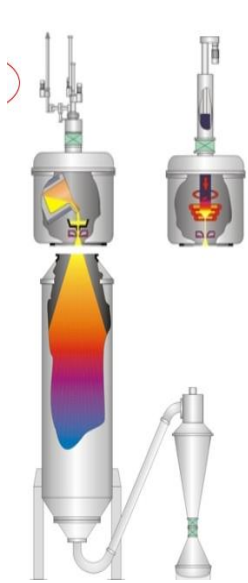
Готові обточені електроди для розпилення порошку



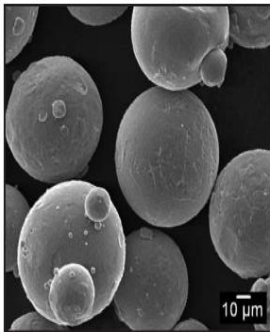


Технології адитивного отримання виробів з металевих порошків жароміцних сплавів

Газова Атомізація



Проходження розплаву металу скрізь інертний газ, технологія VIGA

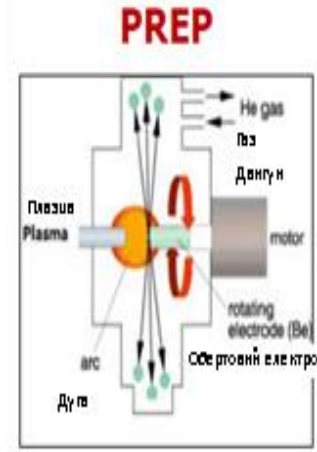


EIGA

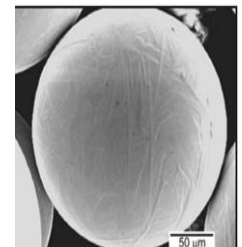
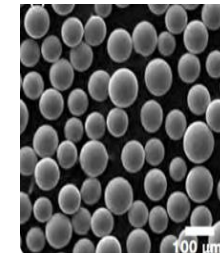


Секція індукційного плавлення електрода, технологія EIGA

Плазмової атомізації



Установка плазмової атомізації обертового електрода, технологія PREP





Технології адитивного отримання виробів з металевих порошків жароміцних сплавів

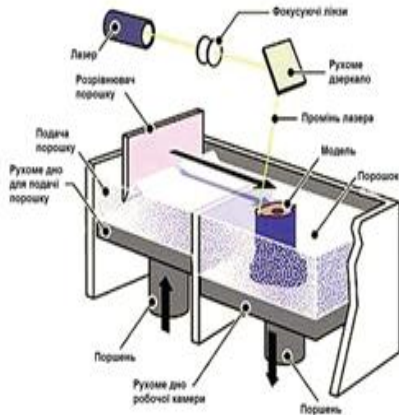
Для виготовлення монолітного завихрювача був обраний порошок зі сплаву на основі нікелю INCONEL 718 AMS 5662. Друк деталей здійснювався на установці EOSM400 методом селективного лазерного спікання (Selective Laser Sintering - SLS)



Конструкція завихрювача



Завихрювач розрізаний за перерізами креслення

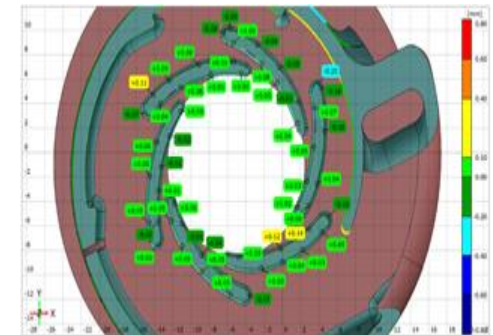


Принципова схема побудови деталей методом SLS



Монолітний завихрювач

Аналіз обмірів показує значно кращу точність друкованого завихрювача, що має гарно вплинути на стабільність витратних характеристик по контурах.



Результати обміру перерізу завихрювача

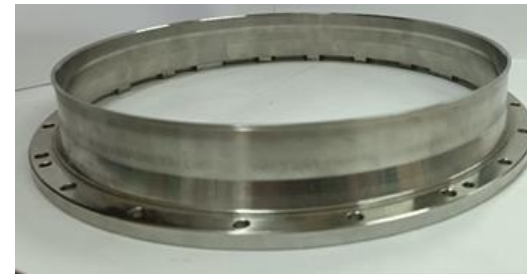


Ремонт та виготовлення корпусних деталей на установках мікроплазмового наплавлення

Вирощування заготовки кільця, що входить до складу турбіни двоконтурного турбореактивного двигуна методом мікроплазмового наплавлення порошком із сплаву ЕП648 ($\gamma' = 3-5\%$).



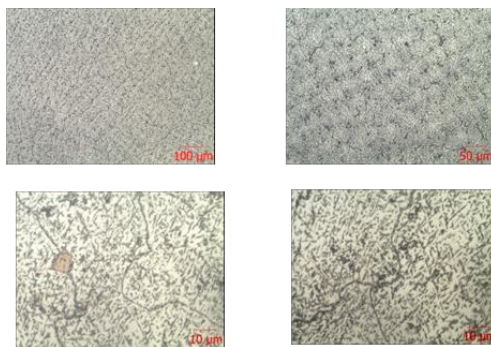
Зовнішній вигляд заготовки деталі «Кільце» після вирощування методом МПН



Зовнішній вигляд механічно обточеної заготовки деталі «Кільце», виготовленої методом МПН



3D-модель деталі «Кільце» під вирощування



Мікроструктура зразків після термообробки

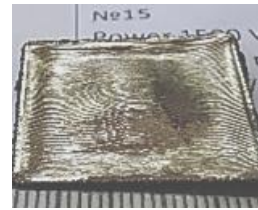
Напрямок вирізки зразку	Температура випробування, °C	Навантаження, кгс/мм ²	Тривалість до руйнування, годин
Вздовж наплавлених шарів	450	73	380 ³⁰
	450	73	380 ³⁰
Поперек наплавлених шарів	450	73	380 ³⁰
	450	73	380 ³⁰
Технічні вимоги на деталь	450	73	≥100

Результати випробувань на тривалу міцність, проведені за температури, що імітує умови експлуатації деталі (при 450°C)



Ремонт та виготовлення корпусних деталей на установках мікроплазмового наплавлення

Процес електронно-променевого наплавлення здійснювався із застосуванням порошку зі сплаву Zr-Ti фракцією 60-120 мкм, марка порошку рZTN-4-2-4 згідно ТУ У 24.4-43658421-002:2021; текучість порошку 24,10 с/50г; насипна густина порошку: 3,76 г/см³) та товщина шару (100 мкм) - постійні фактори.



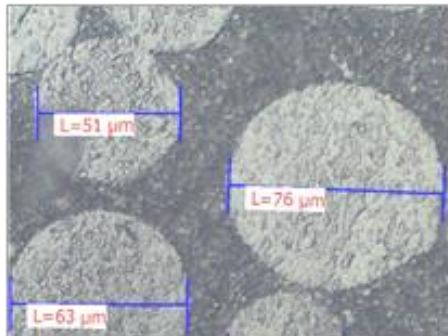
а



б



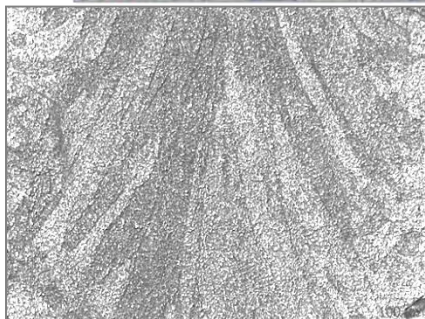
в



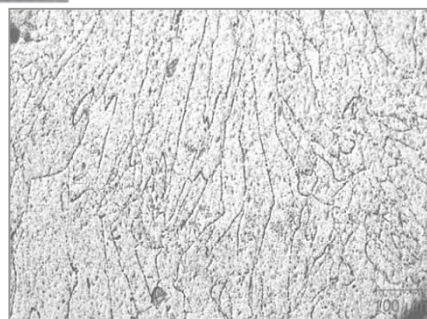
Мікроструктура частинок порошку марки рZTN-4-2-4, ×500

Поверхня (а-в) наплавлених зразків з енергією електронного променя 1000 W і швидкістю сканування 750 мм/с та структура поверхні в поперечному перетині зразка(г)

г



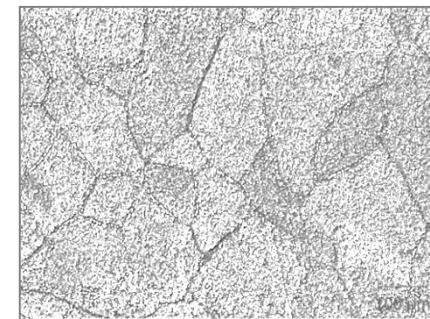
а



б



в

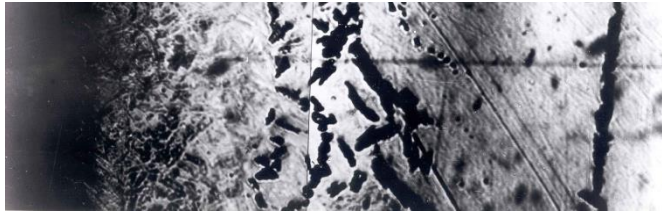


г

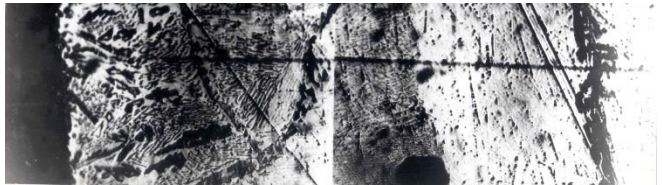
Мікроструктура зразків зі сплаву Zr-Ti, вирощених з наплавленням електронним променем: а – 250 мм/с, 450 W; б – 750 мм/с, 800 W; в – 1000 мм/с, 1000 W; г – 1500 мм/с, 1200 W (×100)



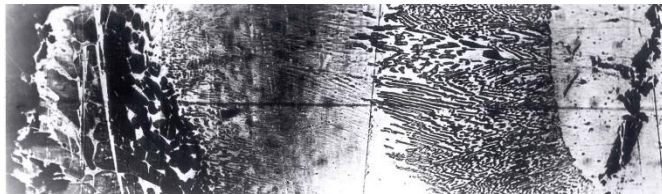
Інноваційні технології зварювання безпористих вуглеграфітових матеріалів з металами для торцевих ущільнень РРД



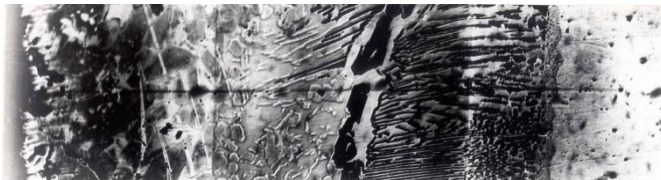
а



б



в



г

Мікроструктури зварних з'єднань ПГІ+15Х28-ВІ

($P_{зв} = 1,5 \cdot 10^7$ Па), $\times 500$:

а – $T_{зв} = 900^\circ\text{C}$, $\tau_{зв} = 20$ хв.; б – $T_{зв} = 950^\circ\text{C}$, $\tau_{зв} = 20$

хв.; в – $T_{зв} = 1000^\circ\text{C}$, $\tau_{зв} = 20$ хв.;

г – $T_{зв} = 1000^\circ\text{C}$, $\tau_{зв} = 60$ хв



Зовнішній вигляд заготовок
торцевих ущільнень з обоймою із сталі
12Х18Н10Т



Зовнішній вигляд штатної
конструкції торцевого ущільнення
ТНА з обоймою із сталі 12Х18Н10Т



Тверді ракетні палива

ВИРОБНИЦТВО ПОРОШКІВ АЛЮМІНІЮ - КОМПОНЕНТА СУМІШЕВОГО ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА



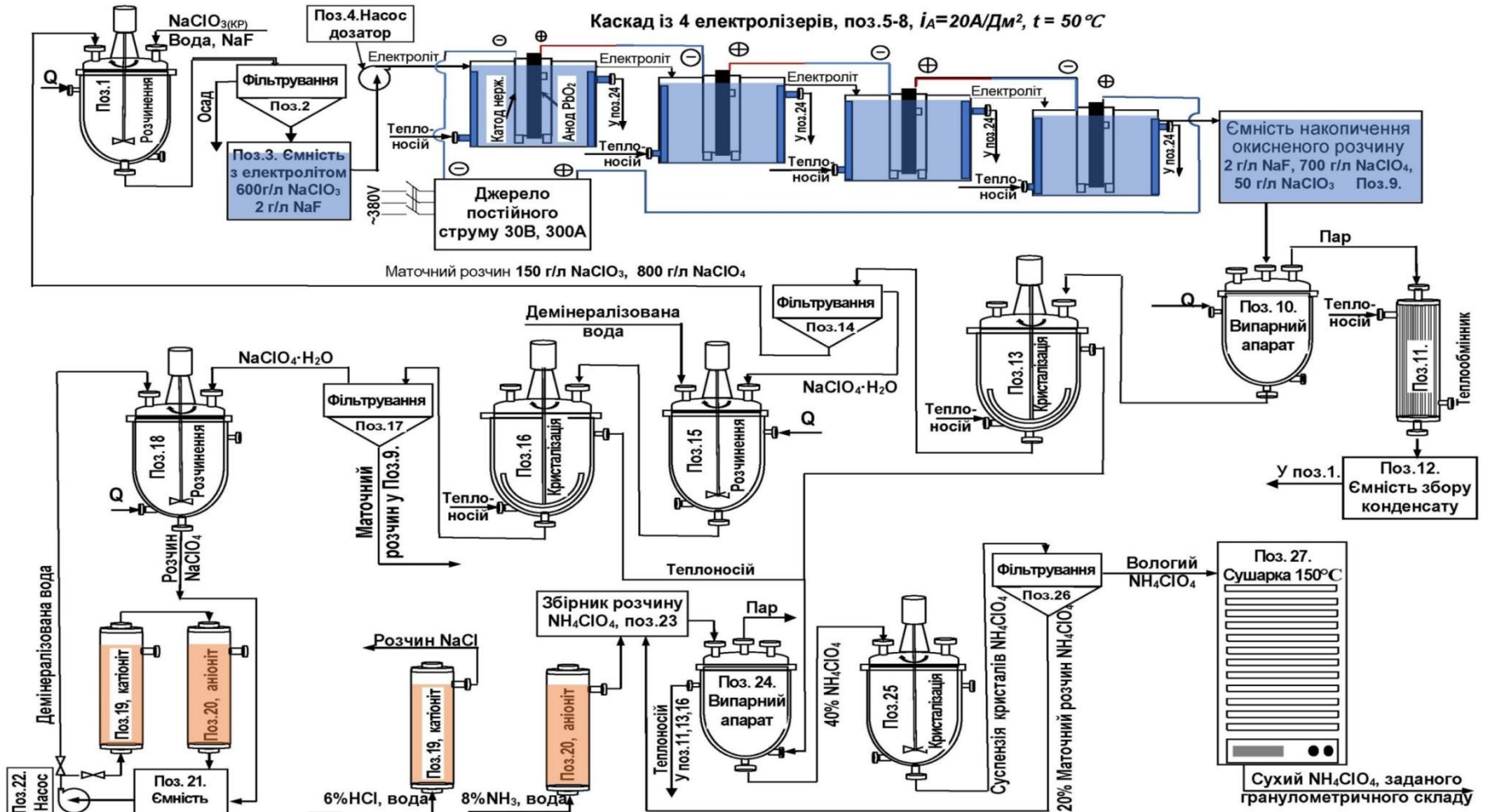
Морфологія поверхні водорозпошених порошоків алюмінію і алюмінієвих сплавів за різних умов охолодження



Схема технологічних процесів виготовлення дисперсного порошку алюмінію



Технологічна схема отримання перхлорату амонію, продуктивністю 30 т/рік

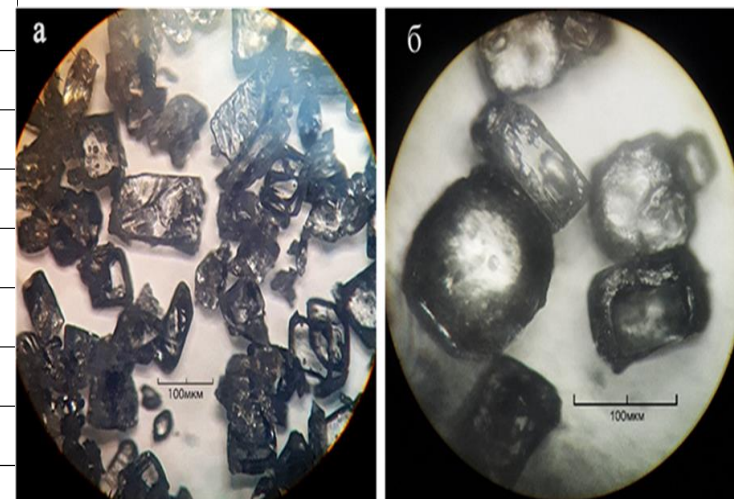




Властивості перхлорату амонію

Хімічний склад одержаних сфероїдизованих зразків перхлорату амонію та їх розподіл по класам крупності у порівнянні з вимогами ГОСТ В 22544-86 та військової специфікації США

Складові	ГОСТ В 22544-86	MIL-A-192B сорт С кл.4	УДУНТ
NH_4ClO_4	$\geq 99,0\%$	$\geq 98,8\%$	$\geq 99,0\%$
NH_4ClO_3	-	$\leq 0,02\%$	$\leq 0,005\%$
Cl^-	$\leq 0,01\%$	$\leq 0,1\%$	$\leq 0,01\%$
SO_4^{2-}	$\leq 0,05\%$	-	$\leq 0,01\%$
Fe	$\leq 0,002\%$	$\leq 0,0025\%$	$\leq 0,001\%$
<u>реч. нерозч. у воді</u>	$\leq 0,01\%$	$\leq 0,1\%$	$\leq 0,01\%$
вологість	$\leq 0,02\%$	$\leq 0,08\%$	$\leq 0,02\%$
Розподіл частинок по розмірам			
-0,500+0,315		4-12%	1-2%
-0,315+0,250		26-38%	8-10%
-0,250+0,160		25-37%	40-45%
-0,160+0,060		16-28%	35-40%
-0,060		5-15%	10-15%



Кристали NH_4ClO_4 : а - ромбоєдричні, б - сфероїдизовані



Тверді ракетні палива

Приготування ТРП
- змішування компонентів,
- інфузійне формування



Лінійка розроблених
твердопаливних двигунів



Льотні випробування



Ракетні двигуни ракет-носіїв та прискорювачі БПЛА

	СИ 1600 мод. 1	СИ 1600 мод. 2	СИ 5000 мод. 1	СИ 5000 мод. 2	СИ 18000 мод. 1	СИ 18000 мод. 2	Прискорювач БПЛА СИ 2200	Прискорювач БПЛА СИ 8000
Сумарний імпульс, Н·с	1557	1740	5100	5560	16220	19704	2330	8000
Середня тяга, Н	445	425	1020	1030	2659	2463	1290	3200
Питома тяга, с	165	185	177	195	169	208	208	230
Час роботи, с	3,5	4,1	5	5,4	6,1	8	1,8	2,5
Маса двигуна, кг	1,4	1,483	3,97	4,13	12,5	12,9	2,26	5,5
Маса палива, кг	0,96	0,96	2,940	2,9	9,8	9,67	1,14	3,5
Довжина, мм	354	360	535	630	950	1050	377	559
Діаметр, мм	60	60	82	82	114	114	80	100
Тип палива	Тверде сумішеве	Тверде сумішеве	Тверде сумішеве	Тверде сумішеве	Тверде сумішеве	Тверде сумішеве	Тверде сумішеве	Тверде сумішеве
Профіль каналу	Циліндр	8-кутна зірка	Циліндр	8-кутна зірка	8-кутна зірка	8-кутна зірка	Циліндр	Циліндр



Впровадження та наукометричні показники

Результати впроваджено на ДП «Конструкторське бюро «Південне ім. М.К. Янгеля», АТ «Мотор Січ», ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат», Державному космічному агентстві України та ТОВ «Мультіфлекс».

Авторами роботи виконано понад 40 держбюджетних, госпдоговірних та міжнародних грантів та проектів на загальну суму понад 100 млн. грн.

Авторами роботи та під їх керівництвом захищено 27 докторських та кандидатських дисертацій

- **6** міжнародних монографій та **14** – вітчизняних
- **8** підручників та навчальних посібників
- **199** наукових статей
- **30** патентів
- **Індекс Гірша**: *Scopus* – **13**, *WoS* – **7**, *Google Scholar* – **12**
- **Кількість цитувань**: *Scopus* – **589**, *WoS* – **231**, *Google Scholar* – **596**



Висновки

1. Створена і продовжує розвиватись національна конструкторсько-технологічна система з розробки і експлуатації надлегких суборбітальних ракетних комплексів подвійного призначення. Вдосконалені стадії практичних досліджень, конструкторських розробок, технологічного освоєння, виробництва, експлуатації і модернізації в інноваційному циклі створення вітчизняних суборбітальних ракет носіїв. За рахунок запропонованих конструкторсько-технологічних рішень розроблені інноваційні конструкції суборбітальних ракет-носіїв надлегкого класу та твердопаливних двигунів для них, що пройшли льотні випробування.
2. Створено математичну модель термомеханічного калібрування (ТМК) корпусів та елементів ракетної техніки з використанням методу скінченних елементів і числовим визначенням параметрів процесу ТМК з урахуванням визначальних факторів впливу: початкової температури прогрівання печі, неоднорідності розподілення еквівалентних напружень та деформацій, нелінійності зміни коефіцієнта температурного розширення матеріалу, відмінності у швидкості прогрівання оправки і обичайки, конструктивних особливостей обичайок, характерної взаємодії обичайки і оправки у випадку несиметричної еліптичності. Вперше отримані уточнені ключові параметри процесу термомеханічного калібрування використані для проектування нових технологічних процесів для великогабаритних тонкостінних виробів типу конічних та циліндричних обичайок головного аеродинамічного обтічника ракети-носія "Циклон-4". Розроблені нові методики і технологічні прийоми термомеханічного калібрування застосовують на державному підприємстві "Виробниче об'єднання Південний машинобудівний завод імені О.М. Макарова".
3. Створені інноваційні адитивні (3D-друк) технології і обладнання для виробництва елементів конструкцій суборбітальних ракет-носіїв надлегкого класу з полімерних композиційних матеріалів, металів та сплавів. Вирішено важливу науково-технічну задачу створення нових і вдосконалення існуючих технологічних методів і прийомів для виробів ракетно-космічної техніки, пов'язаних з розробленням нових технологічних процесів виготовлення великогабаритних конструкцій, які не можна реалізувати існуючими в машинобудуванні технологіями. Реалізовані технології замкнутого циклу виробництва прогресивними адитивними технологіями (від отримання титану губчатого та розпилення порошоків до готового виробу) елементів конструкцій ракетної техніки. Сформовано наукові підходи до раціонального вибору технологічного процесу адитивного вирощування для виготовлення деталей авіабудування різних типорозмірів та із різним ступенем складності форми (лазерний принтинг – для малогабаритних деталей складної форми, електронно-променево пошарове наплавлення в умовах вакууму – для середньогабаритних виробів із титанових, цирконієвих та інтерметалідних сплавів, мікроплазмове 3D-вирощування – для великогабаритних корпусних деталей із нікелевих жароміцних сплавів).



Висновки

4. Вперше теоретично обґрунтовано і експериментально доведено закономірності процесів отримання металевих порошків розпорошенням розплавів водою з тиском до 20 МПа. Створено моделі розпаду металевого струменя, пелени, пасм і крапель, які враховують енергетичні і кінетичні параметри процесів. На основі результатів проведених досліджень розроблено технологію отримання порошку чистого алюмінію і його сплавів методом розпилення струменя розплаву алюмінію водою високого тиску. Вперше розроблено технологічні регламенти, перелік основного технологічного обладнання, обладнання контролю якості, оснащення, які необхідні для виробництва порошку алюмінію, як компонента сумішевого твердого палива, в обсязі 200 т на рік. Випробування твердих палив з новим порошком алюмінію показують характеристики, які не тільки не поступаються, але і перевищують, такі для палив з використанням традиційних порошків АСД-4.

5. Вперше в Україні розроблено іноваційні технології отримання окисників для твердих ракетних палив. Одержані серійні партії перхлорату амонію з наступними характеристиками, %: $\text{NH}_4\text{ClO}_4 \geq 99,0$, нерозчинних у воді речовин $\leq 0,01$, $\text{NH}_4\text{ClO}_3 \leq 0,005$, $\text{Cl} \leq 0,01$, $\text{SO}_4 \leq 0,01$, $\text{Fe} < 0,001$, вологість $\leq 0,02$; розподіл по класам крупності: $-0,500+0,315 - 1-2\%$, $-0,315+0,250 - 8-10\%$, $-0,250+0,160 - 40-45\%$, $-0,160+0,060 - 35-40\%$, $-0,060 - 10-15\%$. По всім показникам одержаний ПХА відповідає вимогам військової специфікації США MIL-A-192B сорту С класу 4.

6. Розроблені технології отримання полімерних в'язучих з використанням доступної сировини – продуктів тіоетерифікації епоксидних смол і полісульфідних та ізопренових каучуків, які виконує функцію матриці-сепаратора твердого ракетного палива, забезпечує фізико-механічні характеристики твердого ракетного палива. Впровадженні тверді ракетні палива мають важливе значення для підвищення обороноздатності та національної безпеки України, зменшення імпортозалежності оборонної та хімічної промисловості, забезпечують створення засобів ураження дальністю до 5000 км. Розроблені ракети і твердопаливні ракетні двигуни з успіхом використовуються у виробі подвійного призначення - ракетних системах військового призначення, прискорювачах безпілотних літальних апаратів, засобах доставки БПЛА в район їх дії та при створенні національних систем ракетно-реактивного озброєння.

7. На основі науково-практичних підходів було створено і вдосконалено цілий комплекс іноваційних технологій, таких як виробництво твердого ракетного палива, виготовлення і відпрацювання РДТП, розробка виготовлення і відпрацювання комплексу бортового радіоелектронного обладнання, організація і проведення стендових і льотних випробувань.



Висновки

8. Створені фізико-хімічних основ енергозберігаючої технології вітчизняних радіопрозорих керамічних матеріалів кордієритового і цельзіанового складу з регульованою мікроструктурою і фазовим складом, які володіють комплексом спеціальних властивостей і використовуються для високоточного ракетного озброєння, зокрема для виготовлення носових антенних обтічників радіолокаційних головок самонаведення ракет різних класів. Кордієритова і цельзіанова фази формується в процесі спікання за рахунок взаємодії частини компонентів дослідних стекел з кристалічними наповнювачами. Розроблено технологію одержання кордієритової і цельзіанової кераміки для носових антенних обтічників. Надані технологічні рекомендації дозволяють виготовляти вироби з нижчою собівартістю за рахунок зниження температури варіння стекел, які використовуються в якості компонентів розробленої кераміки, зниження температури випалу і скорочення тривалості процесу випалу кераміки, а також сприятиме зменшенню залежності вітчизняних підприємств оборонного комплексу від імпорتنих комплектуючих матеріалів. Результати впроваджено при виготовленні носових антенних обтічників на Костянтинівському державному науково-виробничому підприємстві «Кварсит» ДК «Укроборонпром».

9. Для роботи у високонавантажених торцевих ущільнень ракетних двигунів найбільш ефективними ущільнюючим матеріалами є нові безпористі антифрикційні вуглеграфітові матеріали. Для з'єднання таких матеріалів з металами розроблено спосіб дифузійного зварювання, який дозволяє отримати з'єднання безпористих вуглеграфітових матеріалів з металами і надає принципову можливість розробки технології виготовлення торцевих ущільнень з таких матеріалів. Вперше досліджена зварюваність щільних вуглеграфітових матеріалів різної природи безпористості (органічне, металічне просочення, піроліз) з корозійностійкою сталлю і алюмінієвою бронзою. Вперше розроблена і експериментально відпрацьована технологія паяння звареного блоку ПГ1+15Х28-В1 діаметром 90 мм з масивною бронзовою обоймою діаметром 135 мм для виготовленні заготовок торцевих ущільнень РРД 11Д123 ракетних комплексів «Зеніт-2». Результати роботи реалізовано в проектах ДКБ „Південне ім. М.К. Янгеля”, впроваджено в технологічних процесах виробництва торцевих ущільнень двигунів на ДП „ВО „Південний машинобудівний завод ім. О.М. Макарова”.

10. Результати роботи створили підґрунтя для розробки в Україні повного циклу власних суборбітальних ракет подвійного призначення з висотами підйому вище 100 км для наукових досліджень в атмосфері планети і навколоземному космічному просторі.



Висновки

9. Для роботи у високонавантажених торцевих ущільнень ракетних двигунів найбільш ефективними ущільнюючим матеріалами є нові безпористі антифрикційні вуглеграфітові матеріали. Для з'єднання таких матеріалів з металами розроблено спосіб дифузійного зварювання, який дозволяє отримати з'єднання безпористих вуглеграфітових матеріалів з металами і надає принципову можливість розробки технології виготовлення торцевих ущільнень з таких матеріалів. Вперше досліджена зварюваність щільних вуглеграфітових матеріалів різної природи безпористості (органічне, металічне просочення, піроліз) з корозійностійкою сталлю і алюмінієвою бронзою і експериментально доведена можливість отримання дифузійних з'єднань вуглеграфіту АГ1500-BrC-30 і пірографіту ПГІ зі сталлю 12X18H10T через проміжні прокладки. Встановлений механізм утворення дифузійного з'єднання пірографіту ПГІ і сталі 15X28-VI: 1) утворення фізичного контакту між матеріалами за рахунок пластичності сталі; 2) проходження топомічних реакцій на поверхні зварюваних матеріалів (взаємодія атомів вуглецю з приповерхневими шарами сталі 15X28-VI; 3) об'ємна взаємодія (утворення перехідної зони в з'єднанні за рахунок дифузії вуглецю пірографіта в глибину сталі 15X28-VI). З'ясований фазовий склад перехідної зони дифузійного зварного з'єднання пірографіта ПГІ і сталі 15X28-VI (суміш фериту сталі 15X28-VI і карбіду Cr₇C₃) та виявлені загальні закономірності формування структури, механічних і теплофізичних властивостей перехідних зон в залежності від режимів зварювання, що надало можливість керування цим процесом. Математичним моделюванням процесу охолодження після зварювання встановлений характер розповсюдження залишкових напружень в зварному з'єднанні і виявлена його залежність від процесу нагрівання. Розроблена на основі цього технологічна методика дозволила вперше отримати якісне дифузійне з'єднання тонкостінних кілець ПГІ і сталі 15X28-VI діаметром 90 мм. Вперше розроблена і експериментально відпрацьована технологія паяння звареного блоку ПГІ+15X28-VI діаметром 90 мм з масивною бронзовою обоймою діаметром 135 мм для виготовленні заготовок торцевих ущільнень РРД 11Д123 ракетних комплексів «Зеніт-2». Результати роботи реалізовано в проектах ДКБ „Південне ім. М.К. Янгеля”, впроваджено в технологічних процесах виробництва торцевих ущільнень двигунів на ДП „ВО „Південний машинобудівний завод ім. О.М. Макарова”.

10. Результати роботи створили підґрунтя для розробки в Україні повного циклу власних суборбітальних ракет подвійного призначення з висотами підйому вище 100 км для наукових досліджень в атмосфері планети і навколоземному космічному просторі.