

УДК 330.3 + 332.1

І.Ю. МАТЮШЕНКО

НДЦ індустріальних проблем розвитку НАН України, Харків

ПЕРСПЕКТИВИ КОММЕРЦІЙНОГО ЗАСТОСУВАННЯ НАНОТЕХНОЛОГІЙ В РАКЕТНО-КОСМІЧНІЙ ТЕХНІЦІ

Розглянуто проблеми впровадження нанотехнологій і підвищення середньої продуктивності праці у авіакосмічній промисловості за рахунок створення матеріальних об'єктів з низькою собівартістю. Викладено основи концепції конвергенції нано-, біо-, інфо- і когно-технологій, що домінує у науково-технічній політиці розвинених країн світу і створює основу розвитку високотехнологічних галузей економіки. Наведено приклади використання нанотехнологічних розробок з метою підвищення ефективності ракетно-космічних систем, що виконують набагато складніші функції з одночасним зниженням вартості програм. Розглянуто використання нанотехнологій для створення конструкцій та елементів ракетно-космічної техніки з абсолютно новими характеристиками, що створює передумови до зниження собівартості продукції. Приведено прогноз зміни структури і динаміки секторів і сегментів ринку нанопродуктів до 2014 р.

Ключові слова: *нанотехнології, наноматеріали, ринок нанопродуктів, авіакосмічна промисловість, ефективність ракетно-космічної техніки, середня продуктивність праці, собівартість продукції.*

В сучасних умовах технічної революції саме технології виготовлення і використання знарядь праці, виробничі процеси і бізнес-процеси визначають ефективність розвитку економіки. Сьогодні більшість експертів у галузі стратегічного планування, науково-технічної політики та інвестування одноставно стверджують, що вирішення *проблеми підвищення середньої продуктивності праці, перш за все у високотехнологічному секторі економіки*, в найближчому майбутньому стане можливим за допомогою **нанотехнологій**, а саме молекулярного виробництва і створення матеріальних об'єктів з надзвичайно низькою собівартістю. Вивченням цієї проблеми займається багато іноземних вчених, зокрема М. Рокко,

У.Бейнбридж, С. Джарветсон, Р. Фрейтас, П. Кейси, Р. Ханнінк, А. Хілл, Б. Бхушан, Ж. Алферов, Д. Медведєв, В. Прайд, А.Коротаєв, Н. Рамбіді, В. Балабанов, М. Ковальчук, Г. Азоев, Ю. Головін та ін. [1 – 13]. Крім того, чимало українських дослідників також вивчають проблеми комерційного застосування результатів нанотехнологічних досліджень у різних галузях економіки, в тому числі: В. Пономаренко, Ю.Назаров, В. Свідерський, І. Ібрагімов, М. Кизим, І. Матюшенко, Г.Андрощук, Н. Бойко, В. Малишев, П. Таланчук, І.Чекман, М. Сідненко [14 – 22]. В той же час, дослідження питань комерційного застосування нанотехнологій у ракетно-космічній техніці потребує подальшого детального вивчення.

Сьогодні саме *нанотехнології* стають з'єднуючою ланкою між іншими революційними технологічними напрямками, які виникли за останні 20 – 30 років: *комп'ютерної* революції останньої третини ХХ століття, *біотехнологічної* революції останнього десятиліття минулого століття та бурхливого прогресу *когнітивної* науки на початку ХХІ століття. Конвергенція чотирьох революційних науково-технологічних напрямків, а саме: N – нанотехнологій; B – біотехнологій; I – інформаційно-комунікаційних технологій та C – когнітивних наук (або конвергенція NBIC-технологій), та розвиток кожного з них дозволяє одержати якісно нові можливості для усіх сфер суспільного життя [1]. При цьому відбувається взаємний вплив і взаємне проникнення технологій, коли границі між окремими технологіями стираються, а самі цікаві й неочікувані результати з'являються саме в рамках міждисциплінарної роботи на стику наук [8]. Структура нанотехнологічних досліджень представлена на рис. 1 [9, с. 34].

У загальному вигляді, *нанотехнології* – це наука й техніка створення, виготовлення, характеристики й реалізації матеріалів і функціональних структур і устроїв на атомному, молекулярному й нанометричному рівнях [16]. *Нанонауку* можна визначити як сукупність знань про структуру і особливості поведінки речовини у манометровому масштабі розмірів. Таке визначення окреслює проміжну область, що займають нанотехнології – від світу окремих атомів (з характерними розмірами в діапазоні від атомарних до ≈ 100 нм хоча б в одному з трьох вимірів), що досить точно описується квантовою механікою, до макросвіту, який підвладний континуальним теоріям (пружності, гідро- і електродинаміки тощо) [13, с. 29].

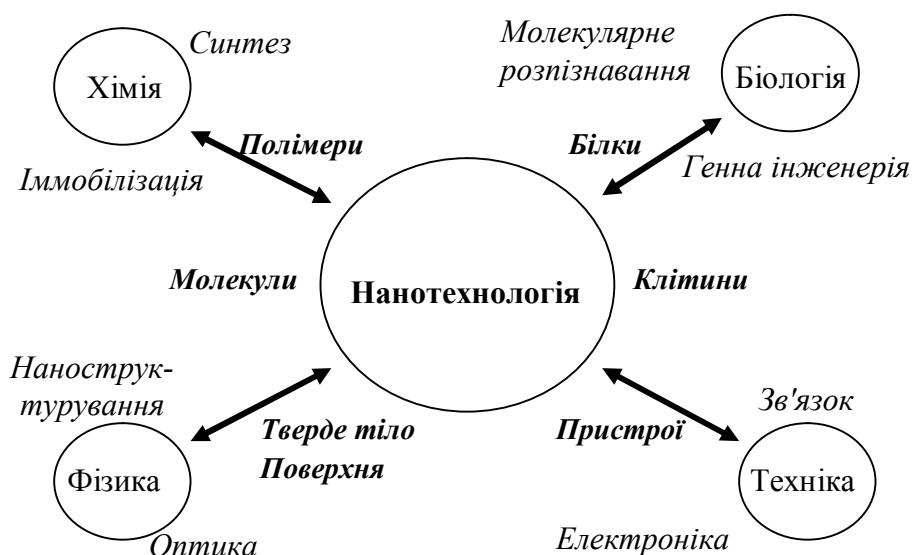


Рис. 1. Структура нанотехнологічних досліджень

29 грудня 1959 р. на щорічному зібранні Американської фізичної спілки Ричард Фейнман у своїй лекції «Ще багато місця у самому низу» сформулював основні *нанотехнологічні принципи* [16, с. 68 – 70]:

- мініатюризація пристроїв, аж до граничних розмірів атомно-молекулярного рівня, яка принципово покращує їх функціональні можливості;

- управління макровластивостями об'єкту за рахунок спрямованої заданої зміни його структури на нано- (молекулярному) рівні.

На протязі останніх сорока років розробка конкретних наносистем підтвердила значущість і привабливість цієї діяльності, що була передбачена наприкінці попереднього століття. Так, у 2002 р. співробітник Аргонської національної лабораторії США Коелінг уточнив зміст таких понять, як нанонаука і нанотехнології, цілями яких є:

- розуміння і передбачення властивостей матеріалів в області нанорозмірів;

- виробництво компонентів нанопристроїв, використовуючи технологічний підхід «знизу – догори»;

- інтегрування нанокомпонентів у пристрої макроскопічних розмірів для практичного використання.

Нанотехнології знаходять все більш широке застосування у *ракетно-космічній техніці (РКТ)* [15, с. 271 – 274]. Сьогодні розвиток РКТ стри-мується високою вартістю виведення вантажів на орбіту, тому зниження масових характеристик її виробів (зниження маси космічного апарату на 1кг забезпечує економічний ефект близько 20 тис. дол. США) при забезпеченні їх функціональних властивостей є однією з головних проблем виробництва РКТ. Область можливих застосувань нанотехнології в авіації і космічній техніці дуже широка, а найбільш перспективні напрями засто-сувань приведені у табл. 1.

Таблиця 1

Перспективні напрями застосувань нанотехнології в авіації
і ракетно-космічній техніці

№ з/п	Напрями застосування	Приклади	Нові можливості
1	2	3	4
1.	Пошуки нових методів зниження розмірів і маси космічних апаратів; підвищення ефективності систем запуску	Наноструктурні матеріали і при-строї	- легкі, міцні і термостійкі <i>деталі літаків, ракет, космічних станцій і дослідницьких зондів</i> для дальніх космічних польотів; - дослідження і виробництво в умовах космічного простору (відсутність гравітації, вакуум) <i>нано-структур і наносистем, що не-можливо отримати на Землі</i>
2.	Розробка високоякісної обчислювальної техніки	Обчислювальна техніка	Обчислювальна техніка з низьким енергоспоживанням і стійка до радіації
3.	Створення наноапаратури для мініатюрних космічних апаратів	- кремнієві гіроскопи, акселерометри, датчики тиску, клапани, мікроджерела енергії, мікроприводи і мікродвигуни;	- МЕМС, створені на основі мініатюризації та інтеграції, мають дуже корисні для космічної техніки властивості виробів: портативність, високий термін служби (гранично малі маси елементів мінімізують вібраційні та інерційні перевантаження), низьке споживання енергії, простота в обслуговуванні й заміні; - МЕМС дозволять на порядок зменшити розміри, масу і споживання енергії космічних апаратів;

Продовження табл. 1

1	2	3	4
3.		<p>- системи хімічного і біологічного аналізу;</p> <p>- електростатичні приводи як мікроперемикачі СВЧ-сигналів;</p> <p>- високочастотні оптичні та механічні фільтри і високочастотні ключі;</p> <p>- оптичні прилади, засновані на використанні масивів мікродзеркал, орієнтація яких може керуватись;</p>	<p>- приводи і двигуни, створені за технологією МЕМС, будуть здатні забезпечити значні сили і крутячі моменти, замінять звичайні механізми і стануть ключовим при створенні <i>мікросупутників, мікрозондів і мікропланетоходів</i></p> <p>Мініатюризація <i>біоаналітичних приладів, придатних для використання на інших планетах</i>. Такі прилади можуть включати мініатюрні капілярні системи електрофорезу, ДНК-детектори, хімічні сенсори і біосенсори для дослідження біослідів</p> <p>- мікроперемикачі СВЧ-сигналів перспективні для використання в <i>космічних системах зв'язку, побудованих з піко супутників</i>, які мають наступні переваги: низькі втрати; висока добротність; низька споживана потужність; ізоляція на високій частоті і низька вартість. Виготовлення електромеханічних перемикачів на одному кристалі з мікроелектронними компонентами дозволяє створити системи з вищою функціональністю;</p> <p>- масиви мікродзеркал, що утворюють єдине дзеркало, використовують як <i>мікромініатюрні просторові модулятори світла</i>. Мікродзеркала можуть модулювати або амплітуду, або фазу падаючого світлового сигналу за рахунок зміни напряму чи довжини оптичного шляху світла. Електростатичні приводи є ефективним способом управління положенням мікродзеркала, що забезпечує мінімальну масу виробу</p>

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
4.	Розробка нанодатчиків і наноелектронних пристроїв для авіаційної і космічної техніки	<ul style="list-style-type: none"> - нанопристрої для авіаційної техніки; - наносупутник SNAP-1 (Великобританія) модульної конструкції, масою 6,5 кг; - мікрореактивні двигуни з розмірами 12x15x2,5 мм, що створюють тягу до 1 кг; - пікосупутники зв'язку масою до 250 г.; - планетоходи масою декілька кілограмів; 	<p>«Розумна поверхня» з активним управлінням буде доступна для літаків і космічних кораблів</p> <p>Відмінною рисою космічної техніки майбутнього буде її <i>структура</i>, яка подібно до живих організмів матиме інтегровані в єдине ціле паралельні і розподілені десятки тисяч мініатюрні адаптивні і інтелектуальні <i>осередки типу «сенсор-процесор-активатор»</i>. Такі осередки, що характеризуються єдиним принципом побудови, будуть мати специфічні особливості, зумовлені їх призначенням, тобто відрізнятись набором сенсорів і активаторів, а також продуктивністю і типом керуючого мікропроцесору. Застосування таких осередків дозволить істотно розширити функціональні можливості існуючих виробів космічної техніки, а також створити принципово нові типи <i>піко- і наносупутників, планетоходів, пристроїв і приладів космічного призначення</i></p>
5.	Створення термоізоляційних і зносостійких покриттів на основі наноструктурних матеріалів	Покриття на основі наноструктурних матеріалів	Термоізоляційні і зносостійкі покриття з властивостями, що не були доступні для традиційних матеріалів і способів їх нанесення

Наносистеми представляють собою у загальному вигляді розподілені середовища зі складними механізмами взаємодії на нанорівні. Саме ці механізми визначають процеси самозбирання або самоорганізації на рівні структури системи, які призводять до появи нових, виникаючих на макрорівні властивостей системи.

Останнім часом відбувається *розширення поняття нанотехнології* – зараз до неї відносять не тільки системи й вироби з розмірами менше

100 нм. У широкому значенні цей термін уже застосовується навіть для мікроелектричних механічних систем (MEMS) – класу мікроскопічних устроїв, виготовлених методами, запозиченими у виробників мікросхем. MEMS – надмініатюрні за будь-якими мірками, але їхні габарити можуть в 1000 разів перевищувати нанорозмірні об'єкти. Це пов'язане з тим, що в такий спосіб залучається увага до прикордонної зони між найменшими продуктами мініатюризації й найбільших виробів молекулярного конструювання. Саме завдяки гібридним компонентам і технологіям у цій галузі буде відбуватися поступовий розвиток і освоєння нанотехнологій. І тоді термін MEMS можна буде цілком обґрунтовано можна буде замінити новим – NEMS (наноелектромеханічні пристрої) [15, с. 48 – 50].

Внаслідок схожості принципів побудови і функціонування розподілених систем на різних рівнях структурної організації, а також виникаючих в них процесів і нових властивостей, виявляється і ряд аналогій між системами, побудованими на рівні нанорозмірів, і макроскопічними розподіленими системами.

Найбільш яскравим прикладом є роботи, що виконуються у розвинених країнах (перш за все, у США) зі створення систем «піко» і «нано» супутників. Ці системи обіцяють серйозний прорив у можливостях дослідження космічного простору. На протязі останніх років різко зросли можливості мініатюризації космічних апаратів. Істотний прогрес напівпровідникової планарної технології, швидкий розвиток систем MEMS і поява нових конструкційних матеріалів обумовили появу космічних апаратів у широкому ваговому діапазоні.

У зв'язку з цим в останні роки склалася класифікація супутників за вагою. Стандартними супутниками називають космічні системи вагою більше 1000 кг, малими – з вагою від 100 до 1000 кг, мікро- – від 10 до 100 кг, нано- – від 1 до 10 кг і піко- – вагою менше 1 кг. Серед них найбільш привабливими виявилися піко- і наносупутники, на основі яких можуть бути розроблені перспективні, нові за своєю методологією програми космічних досліджень. Одним із прикладів таких програм може слугувати програма Національного управління США з аеронавтики і дослідження космічного простору (NASA) і Годарівського космічного польотного центру (GSFC), спрямовані на детальне вивчення магнітосфери Землі. В її

основі лежать «сузір'я» \approx 100 однакових піко супутників, що виводяться у космос одночасно на різні орбіти з одним й теж самим перигеєм \approx 3 земних радіуса. Апогеї орбіт повинні бути в інтервалі від 12 до 43 земних радіусів з різницею у 3 радіуси. Кожний супутник являє собою спеціалізовану просту систему з двигуном і запасом палива для орієнтації і корегування орбіти. У космос вони виводяться на проміжній платформі, яка розподіляє їх по різним орбітам [9, с. 36 – 37]. У програмі NASA/GSFC передбачається, що одержані під вимірювань на орбіті дані передаються в перигеї на земні станції. Супутники повинні здійснювати як локальні (у поточній точці орбіти) так і дистанційні вимірювання. Для цього їх орієнтація відносно землі стабілізується обертанням або ж по трьох просторових вісях.

Таким чином, окремі елементи системи піко супутників далекі за своїми розмірами від манометрових. Але основні принципи побудови системи співпадають з нанотехнологічними. Найпростіші мікроелементи складають макросистему, що виконує набагато складніші у порівнянні з окремими елементами функції. При цьому значною перевагою системи, у порівнянні з окремим багатофункціональним стандартним супутником, є зниження ваги, що виводиться на орбіту, можливість використання менш потужного носія і, як наслідок, значне зниження вартості програми.

Система NASA/GSFC – одна з найпростіших, які обговорюються сьогодні в науковій літературі, за своєю структурою і функціям. Можливі варіанти побудови систем, в яких певні окремі супутники збирають і обробляють на орбіті інформацію з інших супутників, аналізують її і за необхідністю дають вказівки повторити ті чи інші вимірювання. Ще більш привабливим варіантом є система пікосупутників, побудована на принципах самоорганізації, коли вона перебудовує свою структуру і функції в залежності від одержаних кожним супутником системи даних.

Таким чином, система наносупутників являє собою як би макромодель системи, що функціонує на основі нанотехнологічних принципів. Це можна пояснити тим, що об'єкт, макроскопічні властивості якого змінюються за рахунок спрямованої зміни структури на мікрорівні, являє собою одну з різновидів розподіленої динамічної системи. *Розподіленою динамічною системою* називають просторову сукупність елементарних

для даної системи складових, що виконують певні функції і взаємодіють один з одним. Атоми і молекули в кристалі або ж в аморфному тілі, мікроорганізми у біологічній культурі, окремі молекулярні блоки в блоксополімерах – все це елементарні складові розподілених систем на різних рівнях структурної організації. Динаміка розподілених систем визначається не тільки процесами, що протікають у кожному її елементі (тобто у кожній точці системи), але і взаємодією цих елементів. Тому вона виявляється принципово відмінною від процесів в її елементарних складових і набагато більш складнішою.

Крім того, нанотехнології широко використовуються у *мікросистемній техніці (МСТ)* – міждисциплінарному науково-технічному напрямку, що найбільш динамічно розвивається в цей час і визначає нову революцію в галузі систем, реалізованих на макрорівні [23, с. 62]. Метою цього напрямку є створення в обмеженому обсязі твердого тіла або на його поверхні мікросистем, що представляють собою впорядковані композиції областей із заданим складом, структурою й геометрією, статична або динамічна сукупність яких забезпечує реалізацію процесів генерації, перетворення, передачі енергії й руху в інтеграції із процесами сприйняття, обробки, трансляції й зберігання інформації при виконанні запрограмованих операцій і дій у необхідних умовах експлуатації із заданими функціональними, енергетичними, часовими й показниками надійності.

У табл. 2 представлено співвідношення напрямів розробок і галузей застосування МСТ в сучасних умовах розвитку нанотехнологій [23, с. 67].

Ефект від реалізації робіт в області МСТ визначається:

- використанням інтегрально-групових принципів виробництва, які створюють передумови до зниження собівартості продукції, що стає доступною широкому колу споживачів, включаючи сфери науки, освіти, медицини, малого і середнього бізнесу;
- створенням приладів і машин нового покоління з низькою матеріало- і енергоємністю, які забезпечують вирішення традиційних і раніш не доступних задач в умовах скорочення робочих площ, що потребуються, зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище, підвищення безпеки роботи людини;

Таблиця 2

Співвідношення напрямів розробок і галузей застосування
мікросистемної техніки нового покоління

№ з/п	Галузі застосування	Напрями розробок				
		Сенсори і трансд'ютери	Мікропри-від і мікро-машини	Мікро-і нано-інструмент	Аналітико-технологічні мікросхеми	Міні-робото-технічні засоби
1.	Аерокосмічна техніка	+	+	-	-	+
2.	Автомобільний і залізничний транспорт	+	+	-	-	-
3.	Видобувний і енергетичний комплекс	+	-	-	+	+
4.	Переробна, хімічна та харчова промисловість	+	-	-	+	-
5.	Біотехнології і медицина	+	+	+	+	+
6.	Військова справа	+	+	+	+	+

- широким застосуванням при створенні технологічних мікросистем стандартного обладнання мікроелектронного виробництва, яке на теперішній час в Україні, як правило, не використовується за прямим призначенням;

- можливістю реалізації раніш недоступних процесів в умовах мікрооб'єктів і при використанні над малих кількостей речовини, що зменшує затрати на стадії проведення досліджень і знижує потребу у затратних матеріалах з високою вартістю;

- високою ефективністю аналітико-діагностичних мікросистем в умовах вирішення задач з профілактики захворювань, тобто збереження «людського капіталу».

Нанотехнології також сприяють **створенню конструкцій та структурних елементів** широкого кола виробів машинобудування і будівництва будівель та споруд, які мають характеристики, що неможливо досягти

при використанні звичайних конструкційних матеріалів для різноманітних застосувань [14, с. 48 – 49]. У цій групі особливе місце займають «інтелектуальні» матеріали, які можуть адаптуватися до умов, що змінюються, або виконувати певну функцію у несприятливих для звичайних матеріалів умовах.

Принципово нові властивості *наноматеріалів* пов'язані в першу чергу із квантуванням енергетичного спектру квазічастинок у нанооб'єктах і структурах зниженої розмірності, що найбільш яскраво проявляється у фундаментальній зміні властивостей напівпровідників, магнетиків, органічних і вуглецевих матеріалів, молекулярних ансамблів. Багато що з кардинально відмінних властивостей наноматеріалів стосовно об'ємних матеріалів однакового хімічного складу обумовлено ефектами багатократного збільшення частки поверхні нанозерен і нанокластерів (до сотень квадратних метрів на грам). Із цим пов'язані нові властивості багатьох конструкційних і неорганічних наноматеріалів.

Відповідно до класифікації нанопродуктів, розробленої в рамках аналітичного проекту Міністерства освіти і науки Російської Федерації, речовина або об'єкт вважається *наноматеріалом*, якщо задовольняє наступним умовам [14, с. 46]: має розміри або властивості нанорівня; щонайменше, один із зовнішніх розмірів – в діапазоні нанорівня (тобто менше 100 нм); внутрішні структури (наприклад, кластери, кристаліти або молекули) – в діапазоні 1 – 100 нм; елементи складу – нанорозміру (наприклад, нанокомпозити); структури або характеристики, що розробляються на молекулярному або нанорівні; не продукується живими організмами в кінцевій формі; потребує подальшої обробки, додавання інших матеріалів або додаткових витрат для відповідності цільовому призначенню, що передбачається.

Слід зазначити, що в нанотехнологіях поки (через молодість нової науки!) використовуються в основному лише хімічно однорідні типи матеріалів або структур.

В табл. 3 надається скорочена характеристика кожного з сегментів наноматеріалів [14, с. 47].

В недалекому майбутньому можуть стати надзвичайно перспективними вивчення й використання різних сполучень різнорідних наноматеріа-

лів, що дозволяє одержати велику кількість нових матеріалів найчастіше з несподіваними властивостями. Так, можливі бінарні сполучення різних наноб'єктів при створенні композиційних матеріалів: нульмерних (нанокластери, нанокристали), одномірних (нанотрубки, нанодроти), двомірних (тонкі плівки, тонкі острівні структури), тримірних (аерогелі, полімери). Усього можливі 28 типів *композиційних матеріалів* [24, с. 219].

Таблиця 3

Основні категорії наноматеріалів

№ з/п	Тип наноматеріалу	Визначення	Приклад
1.	Тверді наночастинки	Надмалі тверді частинки нанорозміру, включаючи нанокристали і нанопорошки	Нанчастинки оксиду цинку використовуються як ультрафіолетовий фільтр у сонцезахисних кремах
2.	Нанотрубки та інші порожнисті наночастинки	Порожністі частинки нанорозміру, включаючи нанотрубки, а також інші види порожнистих частинок (нанорожки і нанокапсули)	Еммітери електронів для дисплеїв польового випромінювання
3.	Нанорозмірні тонкі плівки	Покриття, товщина та (або) внутрішня структура яких складають не більше 100 нм	Нанокаталітичні покриття для каталітичних конверторів
4.	Наноструктурні монолітні матеріали	Об'ємні тверді тіла, внутрішня структура яких є нанорозмірною	Активоване вугілля
5.	Нанокompозити	Суміш двох або більше різнорідних компонентів, один з яких має нанорозмір	Нанокompозити

Крім того, в останні роки у ракетно-космічній техніці спостерігається тенденція із застосування *керамічних композиційних матеріалів* у вузлах, на які мають безпосередній вплив високі температури (більше 1500 К) і агресивні середовища. Це пов'язано з тим, що кераміка і композити у цих умовах мають більші за значенням властивості, ніж метали і сплави, зокрема межу міцності, жаростійкість та ін. При цьому кераміка має високу хрупкість, тому найбільшу перспективу мають саме композити на її основі. Армування кераміки різними матеріалами призводить до суттєвого збільшення міцності і зниження хрупкості. Сьогодні, в період бур розвитку

нанотехнологій, з'явилися нові можливості з покращення властивостей кераміки і композитів. Зокрема, за даними закордонних авторів, додавання 0,25% мас. вуглецевих нанотрубок у карбід кремнієву кераміку призводить до збільшення міцності на 30% і більше [25].

Так, в російському Державному науковому центрі «Федеральне державне унітарне підприємство «Центр Келдиша» у відділі нанотехнологій активно ведуться роботи з розробки транспортно-енергетичного модулю (ТЕМ), в рамках яких планується створення нових матеріалів для виготовлення турбіни, трубопроводів та інших відповідальних деталей і конструкцій ТЕМ (рис. 2) [26].



Рис. 2. Застосування нанотехнологій у транспортно-енергетичному модулі

Аналогічні розробки вже більше 10 років ведуться науковими і виробничими організаціями в США, Японії, Індії, Китаї, Франції, Іспанії тощо. Так, у США ведуться розробки наноматеріалів на основі кераміки для виробництва нових турбін, газоводів, камер спалювання та ін., причому ще в 2000 р. була розроблена дорожня карта «керамічного проекту» [27].

В лабораторії AFRL Військово-повітряних сил США (USAF) ведуться розробки композитів для авіації і космонавтики. Зокрема, для нових рідинних керамічних ракетних двигунів і високотемпературних трубопроводів (рис. 3), а також для твердопаливних ракетних двигунів із високотемпературної кераміки (рис. 4) [28 – 31].

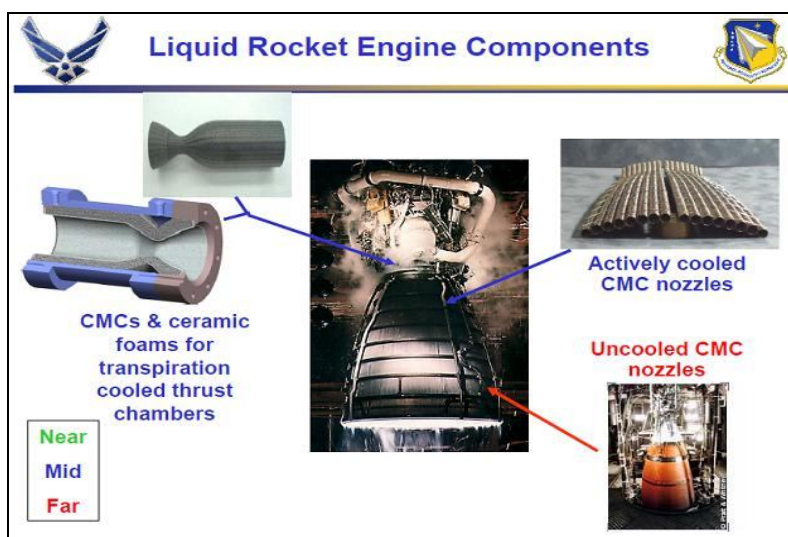


Рис. 3. Перспективні рідинні ракетні двигуни з композиційних матеріалів

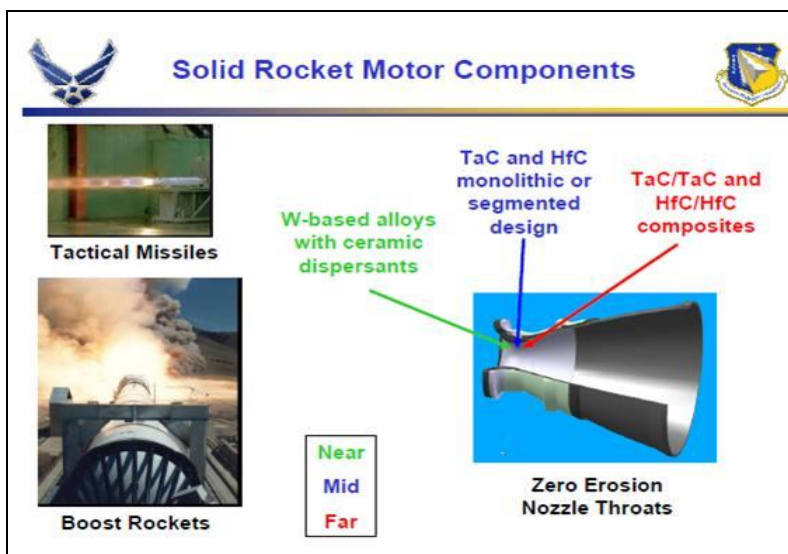


Рис. 4. Високостійкі керамічні твердопаливні двигуни

Приклади застосування наноматеріалів для керамічних турбін приведено на рис. 5.

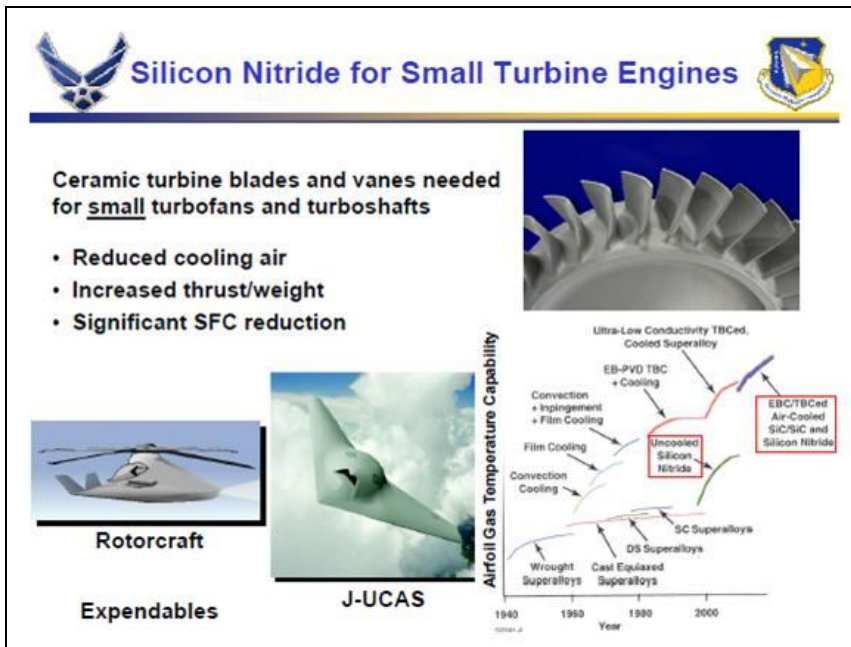


Рис. 5. Керамічні турбіни для газотурбінних і ракетних двигунів

Російською корпорацією «Технологія» (м. Обнінськ) також були виготовлені турбіни на основі $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-BN}$ з високими механічними властивостями, зразки яких представлені на рис. 6 [32].

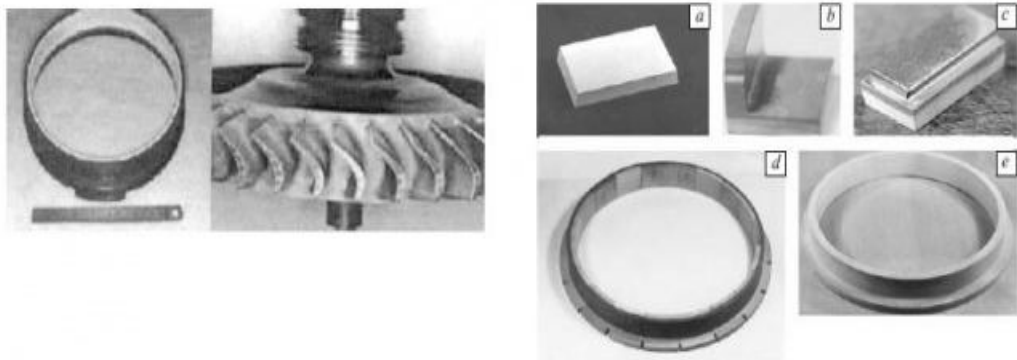


Рис. 6. Зразки турбіни і слоїстого композиту на основі $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-BN}$

Крім того, у ряді країн, головним чином у США і Японії, розроблені «дорожні карти» розвитку наноматеріалів для РКТ (рис. 7) [29].

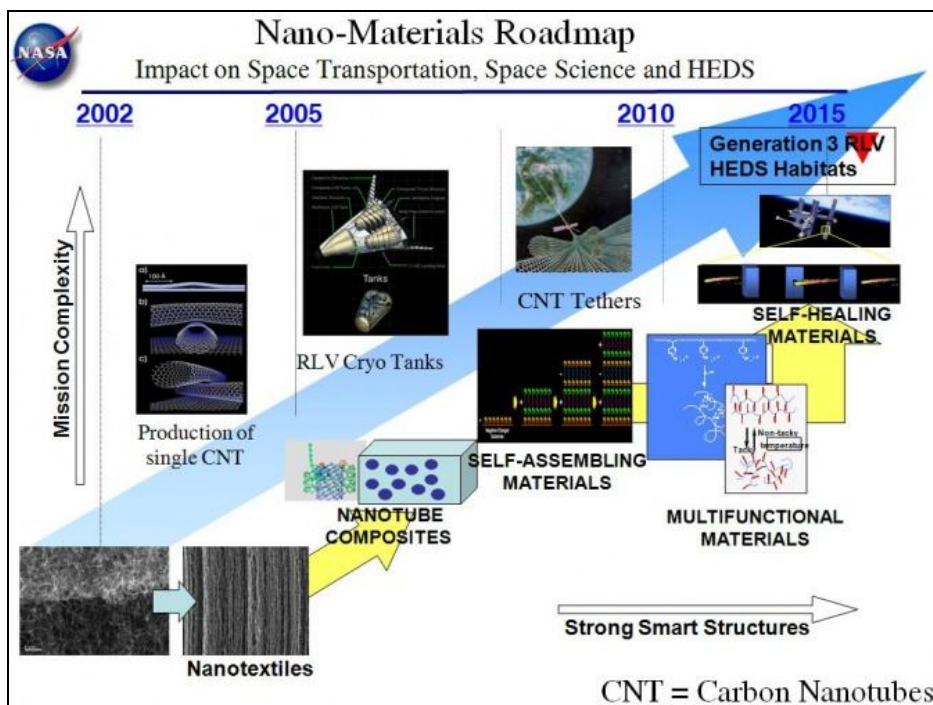


Рис. 7. Фрагмент дорожньої карти розвитку наноматеріалів у NASA

До 2020 р. космічними агентствами США і Японії разом з університетами та іншими організаціями планується створення «розумних» високотемпературних композитів, які будуть спроможні до самодіагностики, самолікування і трансформації.

Враховуючи цю тенденцію розвитку нових технологій і нанотехнологій в російському «Центрі Келдиша» також розробляють «розумні» композити, в структурі яких використовується п'єзокераміка, сплави з ефектом пам'яті форми і нанопристрої на основі вуглецевих нанотрубок.

Схематичне представлення технології одержання надвисокотемпературних матеріалів приведено на рис. 8, а перспективи застосування високотемпературних нанокompозитів в РКТ – на рис. 9 [25].



Рис. 8. Схема технології одержання надвисокотемпературних матеріалів



Рис. 9. Застосування високотемпературних нанокompозитів в РКТ

У табл. 4 приведені характеристики нанокompозитів, що планується розробити у найближчі п'ять років, а також переваги виробів із нанокompозитів [25].

Таблиця 4

Характеристики нанокompозитів, що плануються досягти до 2017 р.
та переваги виробів з нанокompозитів

Характеристики нанокompозитів, що плануються			Переваги виробів з нанокompозитів	
№ з/п	Характеристика	Кількісне значення	№ з/п	Переваги
1.	Міцність при 1000°C	>500 МПа	1.	Покращення технічних характеристик за рахунок підвищення робочих температур
2.	Стійкість при 1500°C	>20000 час	2.	Кардинальне підвищення ресурсу роботи
3.	Тріщиностійкість	>8 МПа/м ²	3.	Зниження ваги за рахунок більшої питомої міцності і спрощення конструкції
4.	Мікротвердість	~30 ГПа	4.	Підвищення надійності роботи РКТ за рахунок відмови від примусового охолодження
5.	Модуль пружності	>280 ГПа		

Тобто, у недалекому майбутньому у авіабудуванні та ракетно-космічній техніці знайдуть широке використання суперсплави на основі інтерметалідів із додаванням композитів, наприклад з'єднання ніобію з алюмінієм Nb₃Al. Робоча температура даного з'єднання – до 2000°C.

Турбінні колеса з такого матеріалу, як Nb₃Al, можуть без охолодження забезпечувати високий коефіцієнт корисної дії, а це значить, що він обов'язково знайде застосування у авіаційних двигунах п'ятого покоління. Крім того, лопатки турбін – це одна з найскладніших і високотехнологічних деталей. Останнє досягнення в області матеріалів – це лопатки, що вирощені як єдиний монокристал, зі всіма порожнинами і каналами для охолодження всередині і та ін.

Таким чином, незважаючи на сучасні технології роботи з металами, композити (і особливо – нанокompозити) перемагають [32]. Якщо в конструкціях американської, європейської і російської цивільної авіації четвертого покоління застосовується приблизно 70% алюмінієвих сплавів і 15 – 20% композитів, то останній Airbus вже на 50% складається з композитних матеріалів, а американці в Boeing 787 Dreamliner підвищили цей показник до 70%. З ракетами і космічними апаратами відбувається теж

саме. Причина – економія маси вантажу, що виводиться на орбіту. При цьому, чим вище «номер ступені», тим більший вираш від використання композитів. Твердопаливні ракети стали композитними практично повністю – з композитів вже давно виготовляють, наприклад, корпуси двигунів як одну нероз’ємну конструкцію. А для рідинних ракет із вуглепластика виготовляють композитний бак для рідкого водню. Використання композитів буде збільшуватись, оскільки вираш може скласти не менше 25% маси конструкції, навіть з урахуванням збільшення товщини.

Відповідно до результатів масштабного аналітичного дослідження ринку нанопродуктів, що формується в Росії і провідних країнах світу, виконаного на замовлення Федерального агентства з науки і інновацій в рамках Федеральної цільової програми «Розвиток інфраструктури наноіндустрії в Російській Федерації на 2008 – 2010 рр.» були зроблені розгорнуті прогнози розвитку цього нового ринку [14, с. 64 – 65]. Зокрема, у табл. 5 представлено порівняльну структуру і динаміку секторів «Наноматеріали» і «Обробна промисловість» у розрізі ринкових сегментів у 2009 р. і у 2014 р.

З табл. 5 видно, що у прогнозованому періоді з 2009 до 2014 р.:

- продажі сектору «*Наноматеріали*» у вартісному відношенні зростуть більше, ніж у 1,5 рази (з 10,1 до 16,7 млрд дол.); середній темп росту сектору у складних відсотках складе 10,6%, з найбільшим темпом – 25,2% - буде розвиватись сегмент «Нанокompозити». За кількістю наноматеріалів, що знаходяться в розробці, домінують полі наночастинки і нанокompозити, які у найближчій перспективі перехоплять лідерство у нанорозмірних плівках, що переважають сьогодні серед лідерів продажів (65%);

- обсяг сектору «*Обробна промисловість*» у вартісному значенні збільшиться більше, ніж у 1,5 рази (з 3,6 до 6,4 млрд дол.), а найбільші темпи росту покаже сегмент «Нанодатчики» (23,8%). Основна ж частка ринку залишиться за нанокаталізаторами (більше 85%), що пов’язано зі зрілістю технологій і великою кількістю застосувань, що існують. Також швидкими темпами будуть зростати промаї: нанокompозитів на основі глини (24,2%) і кераміки (22,5%);

Таблиця 5

Структура і динаміка секторів у розрізі ринкових сегментів у 2009р. і 2014р.

№ з/п	Сегмент	Обсяг у 2009 р., млн.дол.	Обсяг у 2014 р., млн.дол.	Середньорічне зростання у 2008 - 2014 рр., %
<i>Сектор «Наноматеріали» (в тому числі для РКТ)</i>				
Всього, в тому числі		10112,8	16702,9	10,6
1.	Нанорозмірні тонкі плівки	6591,2	9060,8	25,2
2.	Тверді наночастинки	1792,7	3693,3	14,6
3.	Наноструктурні мо-нолітні матеріали	1391,6	2207,2	9,8
4.	Нанокompозити	336,3	1072,7	7,1
5.	Нанотрубки та інші полі наночастинки	0,95	669,0	-
<i>Сектор «Обробна промисловість» (в тому числі РКТ)</i>				
Всього, в тому числі		4006,0	6396,3	10,1
1.	Нанодатчики	308,0	435,2	23,8
2.	Нанокаталізатори	3264,2	4567,8	6,6
3.	Нанокompозити	268,1	677,2	20,0
4.	Інші застосування	165,8	716,2	32,7

- що відвертають прилипання покриттів (31,9%), а також аерогелевої ізоляції будівель (40,1%). Частка нанодатчиків зростає більше, ніж у 2 рази, а нанокompозитів – у 1,5 рази. За вартістю таке зростання буде ще значнішим: по нанодатчикам – більше, ніж у 3 рази, по нанокompозитам – у 2,5 рази.

Таким чином, широке застосування нанотехнологій в ракетно-космічній техніці дозволить одержати унікальні властивості пристроїв, які раніше були недоступні. Крім того, з розширенням ринку нанопродуктів, вартість виробів буде різко знижуватись, що дозволить підвищити ефективність використання РКТ.

Література

1. Роко, М.К. Конвергенция и интеграция [Текст] / М.К. Роко // Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности; под ред. Л. Фостер. – М.: Техносфера, 2008. – 352 с.
2. Джарветсон, С. Коммерциализация нанотехнологии. Работает ли закон Мура в микро- и нанoeлектронике? [Текст] / С. Джарветсон // Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности; под ред. Л. Фостер. – М.: Техносфера, 2008. – 352 с.
3. *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science [Text]* / Edited by M.C. Roco, W.S. Bainbridge. – Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003.– 482 p.
4. Freitas, R.A. Economic Impact of the Personal Nanofactory [Text] / R. Freitas // *Nanotechnology Perceptions*. – 2006.– № 2. – P. 111 – 126.
5. Кейси, П. Технологии наночастиц и их применение [Текст] / П. Кейси // *Наноструктурные материалы*; под ред. Р. Ханнинка, А. Хилл. – М.: Техносфера, 2009. – 488 с.
6. *Справочник Шпрингера по нанотехнологиям (в 3-х томах) [Текст]* / под ред. Б. Бхушана, Т.1.– М.: Техносфера, 2010. – 864 с.
7. Наноматериалы и нанотехнологии [Текст] / Ж.И. Алферов., П.С. Копьев, Р.А. Сурсис и др. // *Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам: сборник статей под ред. П.П. Мальцева.*– М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
8. Медведев, Д.А. Конвергенция технологий – новая детерминанта развития общества [Текст] / Д.А. Медведев // *Новые технологии и продолжение эволюции человека? Трансгуманистический проект будущего*; отв. ред. В. Прайд, А.В. Коротаев. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – С.47 – 84.
9. Рамбиди, Н.Г. Нанотехнологии и молекулярные компьютеры [Текст] / Н.Г. Рамбиди. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 256 с.
10. Балабанов, В.И. Нанотехнологии: правда и вымысел [Текст] / В.Балабанов, И. Балабанов. – М.: Эксмо, 2010. – 384 с.
11. Ковальчук, М.В. Конвергенция наук и технологий – прорыв в будущее [Электронный ресурс] / М.В. Ковальчук // *Российские нанотехнологии*. – 2011. – Т.6, № 1-2. – Режим доступа: http://www.portalnano.ru/read/i/infrastructure/russia/nns/kiae/convergence_kovalchuk. – 02.03.2012 г.
12. Ковальчук, М.В. Нанотехнологии – фундамент новой наукоемкой экономики. Новые возможности СНГ в XXI веке [Текст] / М.В. Ковальчук // *Наука та інновації*. – 2008. – №1. – С. 5 – 28.

13. Головин, Ю.И. Наномир без формул [Текст] / Ю.И. Головин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 543 с.
14. Рынок нано: от нанотехнологий – к нанопродуктам [Текст] / Г.Л. Азоев и др.; под. ред. Г.Л. Азоева. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 319 с.
15. Нанотехнологія та її інноваційний розвиток : монографія [Текст] / В.С. Пономаренко, Ю.Ф. Назаров, В.П. Свідерський, І.М. Ібрагімов. – Х.: ВД «ІНЖЕК», 2008. – 280 с.
16. Кизим, М.О. Перспективи розвитку і комерціалізації нанотехнологій в економіках країн світу та України [Текст]: монографія / М.О. Кизим, І.Ю. Матюшенко. – Х.: ВД«ІНЖЕК», 2011. – 392 с.
17. Нанотехнології у ХХІ столітті: стратегічні пріоритети та ринкові підходи до впровадження : монографія [Текст] / Г.О. Андрощук, А.В. Ямчук, Н.В. Березняк та ін. – К.: УкрІНТЕІ, 2011. – 275 с.
18. Бойко, Н.М. Особливості розвитку нанотехнологій в Україні [Текст] / Н.М. Бойко // Матеріали XV міжнарод. научно-практ. конф. «Проблеми и перспективы инновационного развития экономики: Региональное инновационное развитие: политика, управление, законодательство», 13 – 18.09.10, Алушта, 2010. – С. 28 – 31.
19. Малишев, В. Майбутнє – за нанотехнологіями [Текст] / В. Малишев // Газета «Університет «Україна». – 2007. – № 9 – 10.
20. Таланчук, П. Становлення й розвиток нанотехнологій у світі і в Україні: використання інтелектуального капіталу, тенденції розвитку / П. Таланчук, В. Малишев // Газета «Університет Україна». – 2009. – №10 – 11.
21. Чекман, І.С. Нанонаука: перспективи наукових досліджень [Текст] / І.С. Чекман // Наука та інновації. – 2009. – Т. 5, №3. – С. 89 – 93.
22. Сідненко, М.В. Нанотехнології як пріоритетний напрямок державної інвестиційної політики / М.В. Сідненко // Матеріали конф. «Україна наукова» 20-22 грудня 2007 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://intkonf.org/sidnenko-mv-nanotechnologiyi-yak-prioritetniy-napryamok-derzhavnoyi-investitsiyanoi-politiki>. – 02.03.2012 р.
23. Перспективы развития микросистемной техники в ХХІ веке [Текст] / Д.М. Климов, А.А. Васильев, В.В. Лучинин, П.П. Мальцев // Нано-и микросистемная техника. От исследований к разработкам: сборник статей под ред. П.П. Мальцева. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
24. Нагель, Дэвид Дж. Нанодатчики: разработки, перспективы и разнообразие применения [Текст] / Д.Д. Нагель, Ш. Смит // Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности; под ред. Л. Фостер. – М.: Техносфера, 2008. – 352 с.

25. Касимовский, А.А. Сверхвысокотемпературные композиционные наноматериалы для ракетно-космической техники [Электронный ресурс] / А.А. Касимовский, В.И. Костилов, Л.Е. Агуреев // Федеральный интернет-портал «Нанотехнологии и наноматериалы». – Режим доступа: <http://www.portalnano.ru/read/iInfrastructure/russia/nns/keld/agureev>. – 05.05.2012 г.

26. Пилотируемая экспедиция на Марс [Текст] / под ред. А.С. Королева. – М.: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 2006. – 320 с.

27. USACA, US Department of Energy, Energetics, Richerson & Associates, “Advanced Ceramics Technology Roadmap: Charting Our Course”, Joint USACAIDOE Publication, (2000).

28. Watson, M.D. Nanotechnology Interests at the Marshall Space Flight Center Engineering Directorate [Text] / M.D. Watson, S. Shah, R. Kaul // Engineering Directorate, Marshall Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration, 2004. – P. 1 – 10.

29. NASA Nanotechnology Program Content [Text], 2002. – P. 1 – 7.

30. Fuller, J. Air Force Office of Scientific Research: Ceramic and Nonmetallic Materials Program [Text] / J. Fuller. – AFOSR/NA, 2005. – P. 1 – 9.

31. Ceramic Matrix Composite Turbine Disks. Advanced Space Transportation Technology Summary. – FS-2001-04-76-MSFC. Pub. 8 – 1279. – P. 1.

32. Kelina, I.Yu. Rotor seals for gas-turbine engines fabricated from Si₃N₄-BN high-temperature composite materials. / I.Yu. Kelina, N.I. Ershova, A.V. Arakcheev // Refractories and Industrial Ceramics. – 2004. – V. 45, № 3. – P. 185 – 189.

Надійшла до редакції 8.06.2012

Рецензент: д-р екон. наук, проф., директор НДЦ М.О. Кизим, Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України, Харків.

ПЕРСПЕКТИВЫ КОММЕРЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

И.Ю. Матюшенко

Рассмотрены проблемы внедрения нанотехнологий и повышения средней производительности труда в авиакосмической промышленности за счет создания материальных объектов с низкой себестоимостью. Изложены основы концепции конвергенции нано-, био-, инфо- и когно-технологий, которая доминирует в научно-технической политике развитых стран мира и создает основу развития высокотехнологических отраслей

економіки. Приведены примеры использования нанотехнологических разработок с целью повышения эффективности ракетно-космических систем, которые выполняют намного более сложные функции при одновременном снижении стоимости программ. Рассмотрено использование нанотехнологий для создания конструкций и элементов ракетно-космической техники с абсолютно новыми характеристиками, что создает предпосылки к снижению себестоимости продукции. Приведен прогноз изменения структуры и динамики секторов и сегментов рынка нанопродуктов до 2014 г.

Ключевые слова: нанотехнологии, наноматериалы, рынок нанопродуктов, авиакосмическая промышленность, эффективность ракетно-космической техники, средняя производительность труда, себестоимость продукции.

OPPORTUNITY COMMTRCIAL APPLICATION OF NANOTECHNOLOGY IN THE ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

I.Yu. Matyshenko

The problems of implementation of nanotechnology and the increase in average labor productivity in the aerospace industry through the creation of material objects at low cost were considered. From basic concepts devised, converging nano-, bio-, info- and cognitive technologies, which dominates in the scientific and technical policy developed countries of the world and creates a basis for the development of high-tech-rasley economy were stated. Examples of the use nanotehnology development to improve the efficiency of rocket-space systems, which perform much more complex function, while reducing the cost of programs, were provided. The useful of nanotechnology to create structures and components of rocket and space technology with a completely new features, which creates prerequisites for the reduction of production costs, were considered. Of the reduced forecast of changes in the structure and dynamics of sectors and segments of nanoproducts until 2014 were carried out.

Keywords: nanotechnology, nanomaterials, the market of nanoproducts, aerospace, the efficiency of rocket and space technology, the average productivity of labor, production costs of products dependence.

Матюшенко Ігор Юрійович – канд. техн. наук, доцент, докторант Науково-дослідного центру індустріальних проблем розвитку НАН України, Харків, e-mail: igormatyushenko@mail.ru.