

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 15
2 + 2009

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ ЗА РІК + КИЇВ

Спеціальний випуск журналу містить результати циклу робіт, які виконувалися у 2007–2008 роках згідно із Конвенцією між Національним космічним агентством України (НКАУ), Національним центром космічних досліджень Французької Республіки (CNES) та Міжнародною асоціацією сприяння співробітництву з науковцями незалежних держав – колишніх республік Радянського Союзу (INTAS) про співробітництво в рамках спільного конкурсу дослідницьких проектів НКАУ–CNES–INTAS 2006.

Редактор випуску –
доктор фізико-математичних наук О.П. ФЕДОРОВ

ЗМІСТ

Луговий М. І., Слюняєв В. М., Бродніковський Є. М., Бривчевський М., Бродніковський М. П., Васильєв О. Д., Штейнбергер-Вількенс Р. Керамічні паливні комірки для космічних апаратів

Батуркін В. М. Розробка науково-технологічних основ створення сучасних конструкцій теплових труб для космічної галузі в рамках проекту ІНТАС-КНЕС-НКАУ

Мачехін Ю. П., Романько В. М., Шелехов А. О., Негрійко А. М., Яценко Л. П. Рубідієві стандарти частоти: перспективи розвитку і вдосконалення

Бродський Л., Бушувєв Е. І., Волошин В. І., Козлова А. А., Паршина О. І., Попов М. А., Сабліна В. І., Сахатський А. І., Сиротенко А. В., Соукуп Т., Станкевич С. А., Тараріко А. Г. Проект INTAS по разработке автоматизированной технологии классификации земных покрытий: научные задачи, основные результаты и перспективы

CONTENTS

5 *Lugovy M. I., Slyunyaev V. M., Brodnikovs'kyi Ye. M., Brychevs'kyi M., Brodnikovs'kyi M. P., Vasyli'iev O. D., Shteinberg-Vilkens R.* Ceramic fuel cells for space vehicles

16 *Baturkin V. M.* Elaboration of scientific-technological foundations for up-to-date heat pipe design for space application on the basis of the materials of the INTAS-CNES-NSAU project

31 *Machekhin Yu. P., Roman'ko V. M., Shelekhov A. O., Negriyko A. M., Yatsenko L. P.* Rubidium frequency standards: prospects of development and advance

36 *Brodsky L., Bushuev E. I., Voloshin V. I., Kozlova A. A., Parshina O. I., Popov M. A., Sablina V. I., Sakhatskii A. I., Sirotenko A. V., Soukup T., Stankevich S. A., Tarariko A. G.* The INTAS project for the elaboration of automated technology of land cover classification: the scientific problems, main results and prospects

- Куссуль Н., Глухи Л., Шелестов А., Скакун С., Кравченко О., Ільїн М., Грипич Ю., Лавренюк А.* Розроблення науково-технологічних основ інтеграції даних на базі Grid **49** *Kussul N., Hluchy L., Shelestov A., Skakun S., Kravchenko O., Ilin M., Gripich Yu., Lavrenyuk A.* Data Fusion Grid Segment
- Главацький І. М., Главацька Н. І.* Температурна еволюція мартенситної структури монокристалів сплавів Ni-Mn-Ga **56** *Glavatsky I. M., Glavatska N. I.* Temperature evolution of martensitic structure in Ni-Mn-Ga single crystals
- Косторнов А. Г., Шаповал А. А., Мороз А. Л., Фролов Г. А., Шаповал І. В.* Тепловые трубы с капиллярными структурами на основе композиционных градиентных материалов для теплообменных систем космического и авиационного назначения **69** *Kostornov A. G., Shapoval A. A., Moroz A. L., Frolov G. A., Shapoval I. V.* Heat pipes with capillary structures on the basis of composite gradient materials for space and aviation heat systems engineering

ВИДАТНІ ДІЯЧІ КОСМІЧНОЇ ГАЛУЗІ

FAMOUS PEOPLE OF SPACE INDUSTRY

- К 70-літтю со дня рождення професора Віктора Сергеевича Хорошилова **80** 70th birthday of Professor V. S. Khoroshilov

НАШІ АВТОРИ

82 OUR AUTHORS

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

Підписано до друку 22.07.2009. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офс. Ум. друк. арк. 8,82. Обл.-вид. арк. 9,15. Тираж 200 прим. Зам. № 2461.

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом “Академперіодика” НАН України, 01004, Київ, вул. Терещенківська, 4.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

ПЕРЕДМОВА

до циклу робіт, які виконувалися у 2007–2008 роках згідно із Конвенцією між Національним космічним агентством України (НКАУ), Національним центром космічних досліджень Французької Республіки (CNES) та Міжнародною асоціацією сприяння співробітництву з науковцями незалежних держав – колишніх республік Радянського Союзу (INTAS) про співробітництво в рамках спільного конкурсу дослідницьких проектів НКАУ–CNES–INTAS 2006

Відомо, що ефективність досліджень, а також нових розробок та застосувань суттєвим чином залежить від наукового середовища, можливості обміну думками та обговорення результатів у творчому колективі. Саме тому поширеною формою співпраці є створення команд дослідників з різних лабораторій і різних країн для одержання принципово нових проривних рішень.

Така ідеологія закладена в умови спільних проектів, які виконувались протягом 2007–2008 років під егідою космічних агентств України (НКАУ), Франції (CNES), а також Міжнародної асоціації сприяння співробітництву з науковцями незалежних держав – колишніх республік Радянського Союзу (INTAS).

Наприкінці 2005 року Національне космічне агентство України отримало пропозицію щодо організації спільного конкурсу дослідницьких проектів в галузі космічних технологій. Основна мета досліджень – вироблення наукових основ перспективних розробок для супутникових досліджень та інформаційних технологій використання дистанційних даних. Представники НКАУ, CNES та INTAS спільно розробили Конвенцію та погодили перелік напрямів для конкурсу, умови співробітництва та відбору проектів, порядок фінансування. Загальна сума виділена на конкурс складала 1 200 000 Євро. Протягом конкурсу відібрано 11 проектів, у тому числі 7 за участю українських учасників. CNES і INTAS забезпечили 100 % коштів на дослідження іноземних партнерів та 50 % видатків українських учасників. НКАУ фінансувало 50 % обсягу робіт українських вчених.

Слід відзначити, що відібрані роботи одержали дуже високі оцінки міжнародних експертів. Серед них проекти з розробки науково-технологічних основи атомних годинників для космічних систем, теплових труб і паливних комірок для космічних апаратів, сплавів з багатофункціональними властивостями, технологій обробки даних спостереження Землі з космосу.

З матеріалів, наведених в цьому випуску журналу, можна одержати певне уявлення про рівень одержаних результатів, а також оцінити, наскільки вони сприятимуть розвитку новітніх космічних технологій. Слід також відзначити, що конкурс НКАУ–CNES–INTAS є одним з небагатьох прикладів успішного співробітництва в галузі космічних досліджень між українськими європейськими інституціями.

УДК 620.17 + 621.762.002.3

М. І. Луговий¹, В. М. Слюняєв¹, Є. М. Бродніковський¹, М. Бричевський¹,
М. П. Бродніковський¹, О. Д. Васильєв¹, Р. Штейнбергер-Вількенс²

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, Київ

² Дослідницький центр Юліха, Німеччина

КЕРАМІЧНІ ПАЛИВНІ КОМІРКИ ДЛЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Розглядаються технологічні засади виробництва плоских твердооксидних паливних комірок з несучим анодом на базі оксиду цирконію з добавками оксиду скандію, що має підвищену електропровідність. Наведено результати дослідження мікро-розтріскування цього електроліту, напиленого електроннопроменевим способом. Актуальність таких досліджень полягає в тому, що механічна цілісність електроліту є передумовою надійності твердооксидних паливних комірок і використання їх у космічних апаратах. Розглянуто також механізми деградації компонентів паливної комірки шляхом послаблення між-зерених границь через сегрегацію домішок під час експлуатації.

ВСТУП

Паливні комірки трансформують хімічну енергію палива безпосередньо в електричну та теплову енергію, причому електрохімічний процес окислення характеризується вищим коефіцієнтом корисної дії та меншою екологічною шкідливістю, ніж у звичайних умовах спалювання. Паливні комірки — це практично невичерпні «батарейки», до яких постійно підводяться паливо та повітря [36].

Зусилля вчених та розробників зараз сконцентровані на технологічних рішеннях щодо застосування паливних комірок на автомобільному транспорті, в авіації та космонавтиці. При цьому авіаційна та космічні галузі висувають підвищені вимоги до їхньої механічної стабільності та надійності. Незважаючи на це, можна очікувати навіть вищої ефективності застосування паливних комірок в авіації та космонавтиці завдяки тому, що водяну пару від вихлопних газів можна використати для поповнення запасу води. Вимоги до зниження атмосферних викидів в авіації безперервно зростають, що пояснює значну зацікавленість в технології паливних комірок таких всесвітньо відомих виробників літаків, як «Боїнг» та «Аеробус Індастріз». Останнім часом

значно підвищився інтерес до використання паливних комірок в космічних технологіях [32].

З початку 1960-х років розробка технології твердооксидних паливних комірок (ТОПК) головним чином орієнтувалась на їхнє застосування у потужних (понад 100 кВт) енергетичних системах з високою робочою температурою (1273 К). Висока температура була необхідна для збільшення іонної провідності електроліту, що дозволяло підвищити ефективність ТОПК. Проте високі експлуатаційні температури суттєво обмежували вибір матеріалів для паливних комірок через сильну термічну деградацію [28]. Це, у свою чергу, обмежувало вихідну потужність паливних комірок через переважне використання керамічних матеріалів з достатньою корозійною стійкістю, але з низькою електричною провідністю.

Таке обмеження обумовило необхідність розробки ТОПК з нижчою робочою температурою 923–1123 К. Це стало можливим завдяки нанесенню надтонких шарів електроліту на анодному (катодному) субстраті [34]. Зниження експлуатаційної температури паливної комірки дозволяє, в свою чергу, знайти дешевші матеріали для компонентів ТОПК, а також відкриває можливості для пошуку нових галузей їхнього застосування [15].

Традиційними матеріалами для високотемпературних ТОПК є перовскіт $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSM)

© М. І. ЛУГОВИЙ, В. М. СЛЮНЯЄВ, Є. М. БРОДНІКОВСЬКИЙ,
М. БРИЧЕВСЬКИЙ, М. П. БРОДНІКОВСЬКИЙ,
О. Д. ВАСИЛЬЄВ, Р. ШТЕЙНБЕРГЕР-ВІЛЬКЕНС, 2009

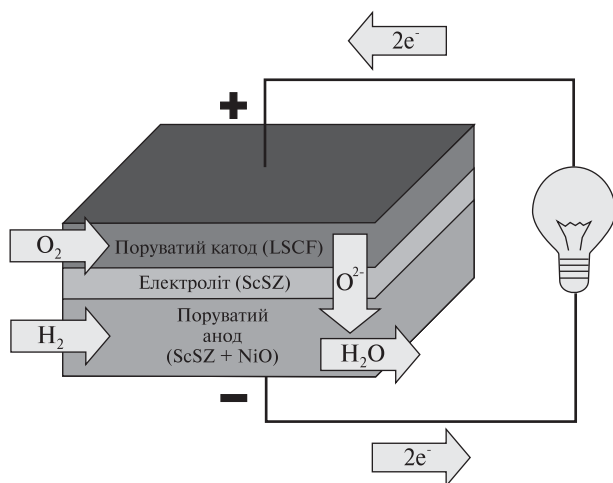


Рис. 1. Плaska твердооксидна паливна комірka на базi ScSZ i LSCF

як матеріал катода, ZrO_2 , стабілізований домішкою 8 мол. % Y_2O_3 (YSZ), для використання в якості електроліту, а також кермет Ni-YSZ для виготовлення анода. Параметр x для LSM-катода дорівнює 0.15–0.25, тоді як співвідношення $NiO/YSZ = 1:1$ є типовим при виготовленні анодів, причому відбувається реакція відновлення NiO *in situ*, в результаті якої утворюються частки нікелю, розсереджені в пористій матриці YSZ. Анод і катод мають пористість 25–40 %. Як правило, паливні комірki збираються у батареї, що розділяються так званими інтерконекторами, які служать для акумуляції вихідного напруження, для перешкоджання прямої взаємодії окислювача та палива, а також забезпечують структурну цілісність батареї [28]. За останні 10–15 років прогрес в розробці ТОПК на базі YSZ з тонкими шарами електроліту, а також досягнення в технології виробництва компонентів дали можливість суттєво підвищити вихідну потужність лабораторних планарних паливних комірок з 0.25 Вт/см² при 1273 К (у 1989 р.) до 2 Вт/см² при 1073 К [32].

Але до теперішнього часу залишаються невирішеними такі проблеми: значна деградація компонентів (1–2 % на 1000 годин, що обмежує строк експлуатації до 10000 годин); висока ціна отриманої енергії (понад 10000 євро за кіловат); переривчаста експлуатація (термоциклювання та окислення призводять до деградації та руйну-

вання); низька густина енергії при температурах нижче 1023 К. Ці проблеми є наслідком високих температур, підвищеного тиску, необхідного для функціонування, а також властивостей керамічних матеріалів [28, 36].

Використання електролітів з підвищеною іонною провідністю, наприклад оксиду цирконію з добавками оксиду скандію, дає можливість знизити робочу температуру, забезпечуючи при цьому зменшення корозії та деградації. ТОПК з робочими температурами в межах 873–1073 К звичайно позначаються як середньотемпературні ТОПК (СТ-ТОПК). З іншого боку, підвищена провідність також надає потенційну можливість отримання підвищених значень густини енергії при робочих температурах вище 1023 К. Тобто, ці матеріали дозволять не тільки збільшити строк експлуатації ТОПК, а можуть бути використані з метою підвищення компактності допоміжних енергетичних установок на борту космічного апарата [15, 28].

Механічна поведінка компонентів паливної комірки має важливе значення для отримання батарей з підвищеною надійністю. Часто при виготовленні чи експлуатації у складових частинах ТОПК виникають мікротріщини [31, 34], що є небажаним явищем. Тому дослідження умов виникнення мікротріщин є вкрай актуальним.

В даній роботі використовується ZrO_2 з домішками оксиду скандію (ScSZ) як матеріал електроліту і як складова частина аноду, що дозволяє підвищити показники вихідної потужності ТОПК або, альтернативно, знизити експлуатаційну температуру паливної комірки. Схематичне зображення такої пласкої паливної комірки наведено на рис. 1. Однією з переваг матеріалів типу ScSZ є також їх відносно недорогий видобуток у межах України.

Мета роботи — розробка технологічних засад виробництва твердооксидних пласких паливних комірок з несучим анодом, дослідження природи таких явищ, як зародження тріщин і механічне руйнування електроліту, оцінка роботоспроможності ТОПК з урахуванням механізмів деградації компонентів шляхом послаблення границь між зернами через сегрегацію домішок під час експлуатації. Актуальність таких досліджень по-

лягає в тому, що механічна цілісність ТОПК є передумовою її надійності і використання як в авіації, так і в космонавтиці.

ВЛАСТИВОСТІ КОМПОНЕНТІВ ПАЛИВНОЇ КОМІРКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЇЇ ВИГОТОВЛЕННЯ

Попередні дослідження показали, що порошок 10 мол.% Sc_2O_3 — 1 мол.% CeO_2 — 89 мол.% ZrO_2 (10Sc1CeSZ) виробництва Вільногірського гірнометалургійного комбінату (ВГМК, Україна) має більшу здатність до спікання, ніж порошок фірми ДККК (Японія). Кераміка, виготовлена з порошку ВГМК, досягає максимуму міцності 450 МПа при температурі спікання 1773 К. Тріщиностійкість кераміки ВГМК лежить у межах $1.2\text{--}1.7 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ у порівнянні з $0.7\text{--}1.2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ для кераміки ДККК. Знайдено також, що порошок 10Sc1CeSZ виробництва ВГМК має найвищу електропровідність серед вивчених порошоків даного складу в усьому інтервалі робочих температур комірки. Залежність повної електропровідності від парціального тиску кисню для електролітів, виготовлених з різних типів порошоків, показано на рис. 2. Видно, що серед досліджених порошоків найбільшу електропровідність при температурі 973 К має порошок виробництва ВГМК.

Аноди для ТОПК були виготовлені з використанням традиційних технологій. А саме, суміш 40 ваг.% NiO і 10Sc1CeSZ (порошок ВГМК) було розмелено кульками зі спиртом протягом 24 год. Полівініловий спирт був використаний як порутворювач. Зразки у формі дисків виготовлялись одночасним пресуванням з тиском порядку 20 МПа, після чого вони спікались при температурі 1723 К протягом 2 год на повітрі. Попередні дослідження показали, що анодні субстрати відповідають необхідним вимогам щодо міцності (100–150 МПа) та пористості (25–30 %).

Матеріал для катоду $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_3$ (LSCF) був виготовлений з допомогою традиційної твердофазної реакції з порошоків La_2O_3 , SrO, CoO та Fe_2O_3 (всі чистотою 99 %, виробник «Miranda-C»). Стехіометричні склади реагентів піддавали розмелюванню кульками з етиловим спиртом протягом 24 год. Отримані суміші вису-

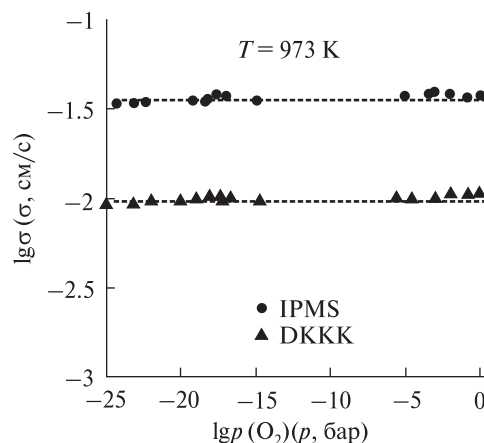


Рис. 2. Залежність повної електропровідності електроліту 10Sc1CeSZ, виготовленого з порошоків різних виробників, від парціального тиску $p(\text{O}_2)$

шували і кальцинували на повітрі при температурі 1173 К протягом 4 год. Фазовий склад речовини визначали методом рентгенографії на дифрактометрі ДРОН-3М у монохроматичному Cu-K_α -випромінюванні. Компактні зразки LSCF отримували одночасним пресуванням порошоків в бруски (тиск 80 МПа) і спіканням при 1473 К протягом 2 год.

На зразках розміром $4 \times 4 \times 20$ мм з використанням високочутливого кварцового дилатометра з оптичною системою вимірювання довжини зразка було виконано дослідження теплового розширення поруватого анодного матеріалу з хімічним складом 40 ваг.% NiO — 60 ваг.% ScCeSZ та катодного матеріалу $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_3$ (LSCF). Шляхом застосування катків діаметром 0.5–0.2 мм можна отримати різні значення оптичного збільшення приладу (4000–10000 \times), що дозволяє з достатньою точністю (0.00025–0.0001 мм) визначати теплове розширення зразків. Нагрівання зразків проводили у повітрі до температури 1223 К зі швидкістю 5–10 К/хв, охолодження — зі швидкістю 5–20 К/хв. Графіки зміни довжини зразків від температури нагріву та охолодження будували з урахуванням розширення кварцу дилатометра і держаків кварцу. Коефіцієнт термічного розширення (к.т.р.) зразка розраховували з виразу $\alpha_{t_2-t_1} = \frac{r(A_2 - A_1)}{Rl(t_2 - t_1)} + \alpha_q$, де l — довжина зразка; r — радіус катка, A_1 і A_2 — відліки довжи-

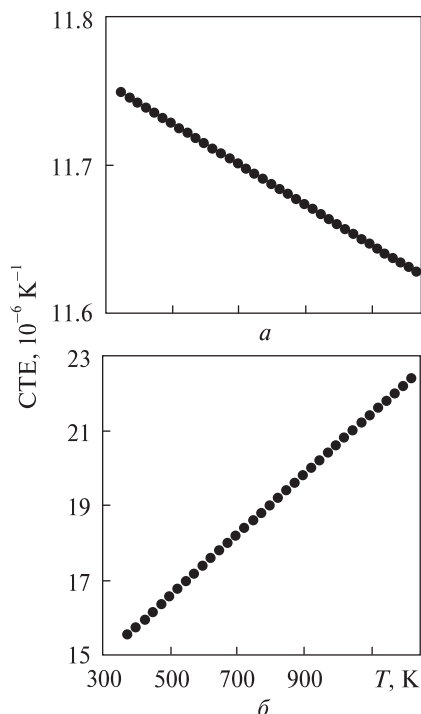


Рис. 3. Температурні залежності коефіцієнтів термічного розширення матеріалів аноду (а) і катоду LSCF (б)

ни по шкалі для температур t_1 і t_2 відповідно; $R = 1000$ мм — відстань від катка до шкали; α_q — коефіцієнт термічного розширення кварцу.

В рамках проведених досліджень було визначено температурну залежність к.т.р. матеріалу аноду в інтервалі 293–1223 К (рис. 3, а), а також його середнє значення, яке дорівнює $11.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Температурну залежність к.т.р. матеріалу катоду LSCF в інтервалі 293–1223 К зображено на рис. 3, б. Середнє значення к.т.р. матеріалу катоду LSCF дорівнює $18.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. З використанням випробувальної машини марки «Інстрон» було виконано механічні випробування на 4-точковий згин (відстань між зовнішніми та внутрішніми роликками 40 та 20 мм відповідно) зразків пористих анодного та катодного (LSCF) матеріалів. Модулі пружності анодного і катодного матеріалів складають 81 і 14 ГПа відповідно. Ці параметри потрібні для розрахунку термічних напружень в паливній комірці.

Покриття з електроліту отримували на лабораторній електронно-променевій двокамерній установці L-2 НПП ГЕКОНТ (Вінниця, Украї-

на). Наявність тритигельного випарного обладнання в робочій камері та допоміжної (перезавантажувальної) камери дозволяє осаджувати різноманітні покриття (одно- та двошарові) на виробі, при цьому параметри технологічного процесу реєструються автоматичною системою.

З метою оптимізації процесу осадження вивчали вплив різних параметрів на мікроструктуру покриттів, а саме температури субстрату (анода), швидкості осадження покриттів, нерівність поверхні субстрату. Температура анода при осадженні покриття є одним з найважливіших технологічних параметрів процесу нанесення покриття, який визначає структуру покриття. Знайдено, що для формування бездефектної структури у керамічних матеріалах температура зразків повинна бути не нижчою, ніж $0.37T_m$ (T_m — температура плавлення речовини, яка конденсується) [1]. На рис. 4 показана мікроструктура електролітної плівки 10Sc1CeSZ, напильної електронопроменевим способом при температурі 1173 К. Вид збоку (рис. 4, а) демонструє стовбчатую структуру електроліту. Видно, що поверхня розділу анод/покриття не має тріщин розшарування, що вказує на добру адгезію осадженої плівки з невідновленим анодом. Видно також, що електроліт щільний і не містить видимих пор. Пори, які є у матеріалі анода, збільшуються на відстані декількох мікрон від поверхні розділу з плівкою електроліту. Вид зверху (рис. 4, б) показує розмір зерен електроліту в його площині. Знайдено, що температура субстрату суттєво впливає на структуру осаджених покриттів. Так, стовбчатая структура покриттів, осаджених при 1173 К, виявляється більш чітко на мікрозображеннях. Слід зазначити також той факт, що характер руйнування плівки електроліту є міжзеренним.

Швидкість осадження покриття — це найважливіший технологічний параметр, який визначає його структуру і властивості. Високошляйна зона у покритті є ефективним бар'єром на шляху проникнення окислювального середовища до поверхні, яка захищається. При незмінній швидкості обертання зразка у паровому потоці кераміки збільшення швидкості конденсації веде до локальної зміни температури на поверхні

шару, що захищається, і як результат — до зміни умов утворення центрів кристалізації і наступного росту зерен кераміки. Так, збільшення швидкості осадження з 0.33 до 0.66 мкм/хв при температурі 1073 К веде до зростання товщини високощільної зони ScSZ, яка утворюється на границі контакту субстрату з керамікою на початку осадження покриття від 1.3 до 5.0 мкм.

Змінюючи технологічні режими випаровування кераміки у початковий момент формування керамічного шару на субстраті, можна регулювати товщину зазначеної високощільної зони покриття. Так, при швидкісному осадженні кераміки (0.9–1.2 мкм/хв) шляхом відкриття заслінки, яка екранує зразки від потоку пари при виході на робочий режим випаровування можна досягти товщини високощільної зони до 8–10 мкм. Поступовий, протягом 8–10 с, вихід на робочий режим випаровування з відкритою заслонкою дозволяє отримати товщину високощільної зони 3–5 мкм.

Оптимальні умови виготовлення анодно-електролітних напівкомірок були вибрані такими. Плівки електроліту були отримані електронно-променевим осадженням 10Sc1CeSZ на пористий анодний субстрат циліндричної форми діаметром близько 25 мм. Зразки, знежирені спиртом, встановлювались у спеціальний пристрій. За один робочий цикл робилось покриття одразу на чотирьох зразках. Пристрій зі зразками був закріплений спочатку в допоміжній камері горизонтального типу, після досягнення необхідного ступеня вакууму (не гірше 10^{-7} Па) він переміщувався в робочу камеру. Швидкість обертання пристрою зі зразками була 8, 14 або 20 об/хв. Відстань субстратів від площини випаровування була 320 мм. Швидкість осадження плівок становила 0.3 мкм/хв, температура субстрату — 973 і 1173 (± 10) К. Для оцінки можливості деламінації плівки від субстрату її товщину варіювали від 2–3 до 80 мкм.

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ МІКРОРОЗТРИСКУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІТУ, НАНЕСЕНОГО ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ НАПИЛЕННЯМ

Оскільки компоненти ТОПК жорстко з'єднані між собою, різниця між властивостями ма-

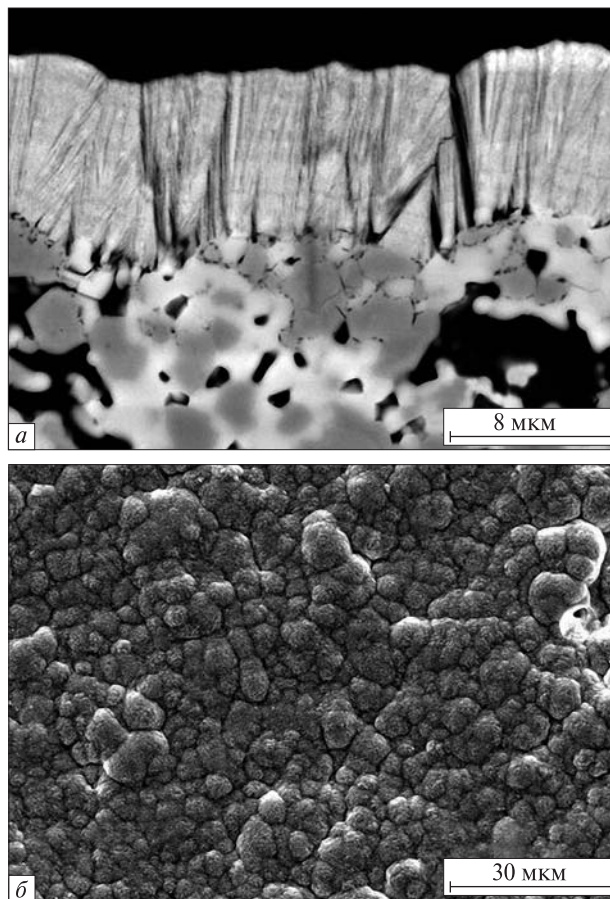


Рис. 4. Мікроструктура електролітної плівки 10Sc1CeSZ, напленої електроннопроменевим способом при температурі 1173 К: *a* — вигляд збоку (міжзеренне руйнування та стовбцева структура електроліту), *б* — вигляд зверху

теріалів обов'язково спричиняє виникнення залишкових напружень, які можуть сприяти руйнуванню, порушуючи справність комірок. Такі напруження можуть виникати при виготовленні ТОПК (наприклад, у процесі спікання паливних комірок чи напівкомірок); це пов'язано головним чином з різницею к.т.р., а також з наявністю термічних градієнтів або градієнтів концентрації дифундуючих речовин [7, 23, 24]. Додаткові напруження можуть виникати також на заключних стадіях виробництва ТОПК, тобто при фіксації комірок в батареї, коли виникають градієнти температури через їхнє охолодження або нагрівання.

Суттєвою особливістю розподілу залишкових напружень в шаруватій структурі є те, що вони

виникають у макроскопічному масштабі. При цьому важливо те, що відносна товщина різних шарів визначає відносні величини напружень розтягу та стиску, тоді як значення деформації несумісності між шарами задає абсолютні значення залишкових напружень. Контроль залишкових напружень та пов'язаних з їхнім виникненням структурних змін вкрай важливі для забезпечення структурної цілісності компонентів шаруватого композиту як при його виготовленні, так і в робочих умовах.

Узагальнюючи моделі механічної поведінки матеріалу з мікротріщинами [9, 12, 26], відмітимо, що всі вони містять в собі наступні положення: інтерпретацію структурного елемента (СЕ); визначення локального критерію руйнування у межах СЕ; врахування перерозподілу напружень через поступове пошкодження; визначення інтегрального критерію руйнування матеріалу. Структурним елементом є окреме зерно, ціле чи розтріскане. Локальний критерій руйнування звичайно базується на статистичному підході Вейбула для крихких зерен або частинок, коли розглядається випадковий розподіл дефектів у зерні (частинці). Є також альтернативний детерміністичний критерій механіки руйнування, коли вважається, що кожне зерно має певний дефект, і критичне напруження руйнування зерна визначається цим дефектом при навантаженні по типу I [12]. Згідно з цим критерієм початковий розмір дефекту розглядається як деяка частка розміру зерна.

Це означає, що більші зерна будуть мати більші початкові дефекти і будуть руйнуватися при менших напруженнях. Відмітимо, що експериментальні дослідження [9, 17] показують, що критичне напруження руйнування частинки залежить не тільки від типу матеріалу, а і від розміру зерна або частинки, що пояснюється наявністю усередині них мікротріщин. Фрактографічні дані пошкоджених композитів підтверджують тенденцію частинок більшого розміру руйнуватися при менших значеннях напруження. Подібний критерій руйнування частинки був використаний в роботі [26]. В роботі [18] експериментально знайдено, що руйнування частинки домінує для більших розмірів зміцню-

вального елемента, а доля частинок, які руйнуються, зростає при збільшенні об'ємного вмісту або середнього розміру зміцнювача. В цьому випадку композити, які мають у своєму складі більший зміцнювальний елемент, акумулюють пошкодження з більшою швидкістю.

В даній роботі проведено мікромеханічний аналіз електроліту паливної комірки на базі структурної моделі руйнування мікронеоднорідних матеріалів [13, 21, 22, 25, 27], яка враховує статистичний розподіл структурних параметрів. Невід'ємними частинами моделі є локальний критерій руйнування структурного елемента, порівняно простий розрахунок перерозподілу напружень через мікророзтріскування, а також інтегральний критерій руйнування, який описує локалізацію руйнування.

Критерій густини енергії деформації використовується у моделі як локальний критерій руйнування деякого структурного елемента. Це дозволяє вирішити проблему випадкового дефекту в зерні шляхом постулювання одинарного критичного дефекту з розміром, який залежить від ефективного діаметра зерна. При цьому можна використовувати більш фундаментальні, ніж тріщиностійкість, характеристики зерна, такі як модуль пружності і поверхнева енергія.

В основі спрощеного розрахунку перерозподілу напружень через мікророзтріскування лежить припущення, що локальне напруження в цілому зерні визначається значенням номінальної прикладеної напруги, помноженим на відношення модуля пружності зерна та ефективного модуля пружності пошкодженого композиту. По суті при цьому використовуються положення континуальної механіки пошкоджень (КМП) [19]. В КМП пошкоджуваність розглядається як внутрішня (скалярна або тензорна) змінна стану матеріалу, яка характеризує ефекти мікроскопічного рівня як феноменологічно, так і макроскопічно. В найпростішому випадку одновісної деформації (або ізотропного матеріалу) цей параметр є скаляром, який пов'яже істинне значення макроскопічної напруги з ефективним напруженням [18]. У відповідності до постулату еквівалентності деформації в КМП визначальні рівняння деформації залишаються незмінними

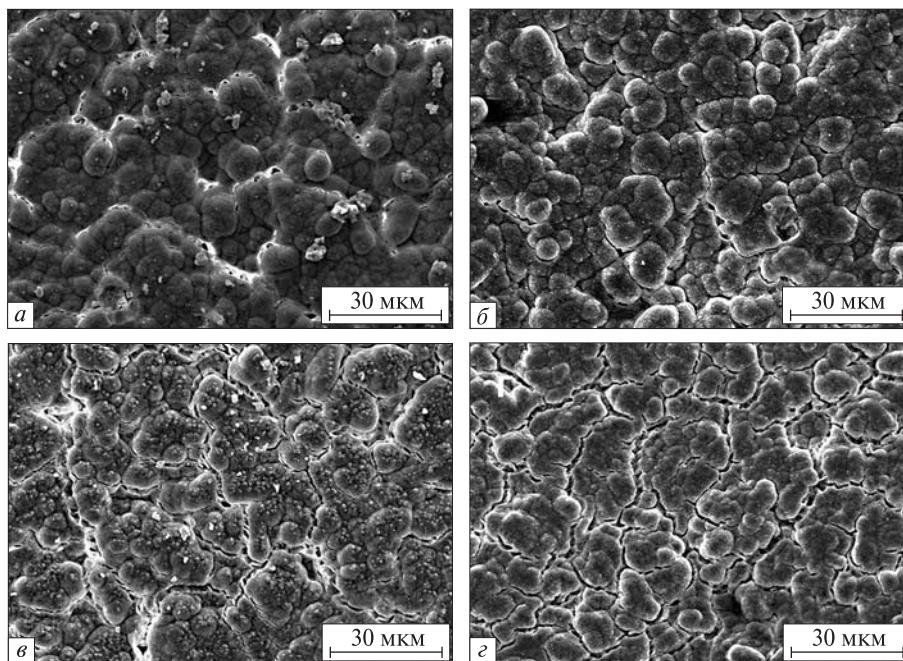


Рис. 5. Мікроструктура електролітної плівки 10Sc1CeSZ після напилення і різних відпалів: *a* — напилення при 1173 К, відпал при 1473 К, *б* — напилення при 873 К, відпал при 1178 К, *в* — напилення при 1023 К, відпал при 1473 К, *г* — напилення при 873 К, відпал при 1473 К

як у пошкодженому, так і в (еквівалентному) непошкодженому матеріалі, з урахуванням того, що звичайне напруження замінюється на його ефективне значення [19].

Ефективний модуль пружності композиту з мікротріщинами може бути знайдений із відомого розв'язку для твердого тіла, що містить багато мікротріщин з випадковим ізотропним розташуванням [3]. Інтегральний критерій руйнування може бути вибраний як такий, що відповідає досягненню максимуму на залежності густини енергії деформації від густини мікротріщин. Він дозволяє зафіксувати момент початку локалізації руйнування у мікроструктурі (перехід від розсіяного пошкодження до локалізованого, коли кожне наступне зерно руйнується тільки у вершині вже існуючої мікротріщини).

Визначення механічних властивостей електроліту, напиленого електронно-променевим методом, є складною науковою задачею. Одним з її можливих рішень є використання відпалів при різних температурах вище температури напи-

лення з подальшим електронно-мікроскопічним дослідженням поверхні електроліту. Кожний такий відпал створює в електроліті рівнобіаксальний напружений стан з певними розтягувальними напруженнями, які залежать від різниці температур відпалу та напилення.

Електронно-мікроскопічні дослідження поверхні електроліту (рис. 5) після відпалу дозволяють визначити густину мікротріщин, що створюється під дією відповідних розтягувальних напружень. При поєднанні цих даних з модельними розрахунками з'являється можливість визначити енергію руйнування по межах зерен в електроліті, а також критичні параметри мікророзтріскування. Густина енергії деформації, що відповідає початку мікророзтріскування, та максимальна густина енергії деформації дорівнюють 0.017 та 0.027 МПа відповідно. Напруження, при якому починається мікророзтріскування, максимальне механічне напруження та напруження, що відповідає переходу до локалізованого мікророзтріскування, складають 82,

100 та 95 МПа відповідно. Густини мікротріщин, що відповідають максимальному напруженню та переходу до локалізованого мікророзтріскування, дорівнюють 0.077 та 0.226 відповідно.

Мікророзтріскування електроліту, що обумовлене відпалами, які застосовувались в роботі, відповідало локалізованому мікророзтріскуванню. Було виявлено такі особливості розтріскування на цій стадії. Середній розмір тріщин збільшується зі збільшенням густини мікротріщин і демонструє тенденцію до насичення, стандартне відхилення дорівнює приблизно половині середнього розміру, кількість мікротріщин зростає незначно, залишаючись майже постійною і рівною кількості тріщин у момент досягнення максимальної густини енергії деформації. Із проведеного дослідження також видно, що мінімальне значення середнього розміру мікротріщин досягається у момент, що відповідає максимальній густині енергії деформації.

МЕХАНІЗМИ ДЕГРАДАЦІЇ КОМПОНЕНТІВ ПАЛИВНОЇ КОМІРКИ

Як і у випадку інших пристроїв, для паливної комірки важливо забезпечити термін працездатності на рівні декількох тисяч годин без втрати ефективності. Ефективність багато в чому залежить від рівня омичних втрат в електроліті ТОПК. Є два шляхи зменшення цих втрат. Один шлях пов'язаний з підвищенням електропровідності матеріалів, наприклад шляхом застосування ScSZ. Разом з тим цей шлях нерідко призводить до втрати довготермінової стабільності та сумісності матеріалів паливної комірки. Інший підхід базується на використанні дуже тонких електролітних мембран на базі диоксиду цирконію товщиною 5–50 мкм. Тонкий електроліт можна використовувати в конструкціях, в яких опірною частиною є порівняно товстий анод. Саме ця комбінація найчастіше використовується останнім часом.

Серед різних можливих форм паливних комірок, пласкі паливні комірки мають найбільшу перспективу для виробництва високопродуктивних, низьковартісних та ефективних електричних генераторів. Разом з тим планарна будова паливної комірки містить в собі небезпеку

втрати механічної стабільності конструкції, бо паливна комірка — це комбінація тонких керамічних шарів. Якщо анод вироблено з композиту Ni-ZrO₂, а електроліт з 8 мол. % стабілізованого ітрієм оксиду цирконію, термонапруження викликають стиснення електроліту при кімнатній температурі і тим самим збільшують його міцність при цій температурі. Залишкові напруження після чотирьох технологічних стадій виготовлення паливних комірок зі зміцненим анодом вимірювались в роботі [11]. Напруження вимірювались на початку виробництва, після спікання, після вирівнювання і після відновлення анода. Метод рентгенівської дифракції показав, що після взаємного спікання різних шарів комірки стиснення електроліту при кімнатній температурі досягало 600 МПа і залишалось практично незмінним упродовж всіх стадій виготовлення комірки. Розтягувальні напруження виникали лише в аноді. У випадку комірок із зміцненим анодом їхній рівень досягав при кімнатній температурі лише 15 МПа. Подібні результати були одержані також з використанням синхротронного опромінення [35]. Такі експерименти дозволяють одержати не тільки середнє значення залишкових напружень але і їхній розподіл в об'ємі. Виявилось, що найбільші залишкові стискні напруження виникають у центрі пластинки електроліту, в кутах вони значно менші через крайові ефекти. Було встановлено, що залишкові напруження не залежать від методу виробництва паливної комірки і породжуються різницею терморозширення електроліту та аноду. Вплив технологічної операції вирівнювання на залишкові напруження був також незначним. Разом з тим в роботі [31] було встановлено, що залишкові напруження в електроліті, нанесеному електронно-променевим методом, суттєво залежать від температури та швидкості процесу. В цьому випадку залишкові термонапруження були менші за технологічні залишкові напруження нанесення електроліту.

В багатьох оксидах, що мають змішану іонно-електронну провідність, додаткові кисневі вакансії виникають в умовах відновлювальних реакцій. Додаткові вакансії викликають розширення оксидів і відповідні напруження, що

можуть розглядатися як хімічно індуктовані напруження. На відміну від термонапружень, хімічні напруження виникають навіть при постійній температурі. Наприклад, типові хімічно-індуктовані деформації складають 0.2–0.4 % при 1273 К для хромітів лантану [8]. Градієнт активності кисню у паливній комірці може призводити до градієнта напружень. Рівень напружень може бути достатньо високим для руйнування керамічних елементів паливної комірки.

Моделювання методом скінченних елементів є ефективним засобом оцінки термонапружень. В роботі [30] термонапруження оцінювались не тільки для стаціонарної стадії роботи комірки, але й для перехідних стадій вмикання і вимикання комірки. Було знайдено, що на стадії вмикання комірки значні температурні градієнти і розтягувальні напруження виникають в комірках з керамічними контактами. В ТОПК з металічними контактами напруження були в десять разів нижчими. Високі температурні градієнти виникають також у тому випадку, коли використовується внутрішній реформінг палива. Моделювання методом скінченних елементів використовувалось в [20] для аналізу можливого руйнування ТОПК. Критерієм руйнування було перевищення одним з головних напружень деякого критичного рівня. Моделювання показало, що для оцінки термонапружень різниця коефіцієнтів терморозширення має більше значення, ніж градієнти температури. З точки зору руйнування було встановлено, що найслабшим місцем конструкції ТОПК є склокерамічний герметик.

Широко відомим є той факт, що механічні властивості полікристалічних матеріалів, які використовуються як компоненти ПК (міцність, тріщиностійкість, повзучість та ін.), а також їхні електричні властивості (електропровідність, діелектричні втрати, електрохімічна активність) суттєво залежать від хімічного складу та структури поверхонь розділу між структурними елементами. Наприклад, суттєву увагу дослідників останнім часом привертають границі зерен стабілізованого ZrO_2 як найбільш перспективного матеріалу — електроліту ТОПК [10, 14, 16, 33]. Так, знайдено, що електричний опір зерногра-

ничних зон цього матеріалу на 1–2 порядки вищий, ніж електричний опір матриці; показано також, що цей опір суттєво залежить від таких факторів, як розмір зерна, наявність домішкових атомів, температура та атмосфера спікання, а також термічна обробка матеріалу. Отримано також експериментальне підтвердження впливу формування домішкової неоднорідності (зернограничних сегрегацій) на границях зерен ZrO_2 та інших іонних кристалів на їхні механічні властивості [10, 33]. Виходячи з цього, вивчення закономірностей формування домішкової неоднорідності на стадіях як отримання, так і експлуатації матеріалів має важливе наукове і прикладне значення.

В основі сучасних теорій міжзеренної крихкості [2, 5, 6, 29] лежить уявлення про рівноважну сегрегацію. Фактично при цьому робиться припущення про те, що при експлуатації матеріалу в деякому інтервалі низьких температур в ньому зберігається рівень сегрегації, який є рівноважним для температури попереднього відпалу. Однак така постановка задачі є ідеальною. Дійсно, сегрегація формується при підвищених температурах, коли стане можливим дифузійний перерозподіл атомів між елементами структури матеріалу. У той же час найвища схильність матеріалів до міжзеренного руйнування проявляється в умовах їхньої експлуатації при низьких температурах, коли сегрегаційні процеси в основному заморожені. Однак перехідні процеси, які протікають у матеріалі при охолодженні, також впливають на сегрегаційний стан границь зерен. Це особливо важливо також для матеріалів-компонентів ТОПК, які працюють в складних квазіциклічних температурних умовах, коли термодинамічні та кінетичні параметри формування сегрегацій можуть бути суттєвими для визначення ступеня деградації механічних та електричних властивостей таких компонентів і для обумовлення строку експлуатації ТОПК.

В роботі [4] показано, що при достатньо високих швидкостях охолодження від високих температур відпалу T_0 зростання тривалості відпалу веде до підвищення рівня «заморожування» сегрегації; у той же час для низьких швидкостей

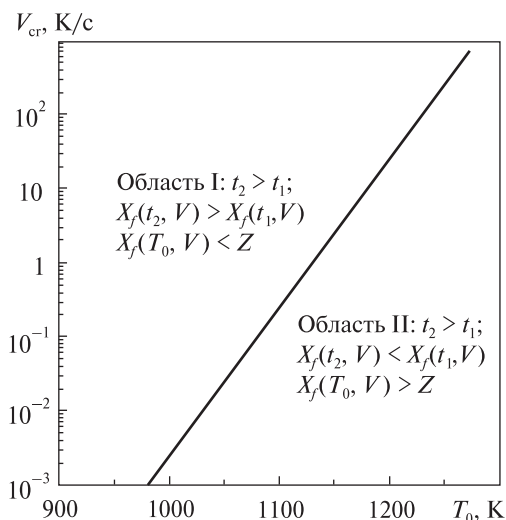


Рис. 6. Залежність критичної швидкості охолодження сплаву від температури відпалу

охолодження характерним є зниження рівня «заморожування» по мірі підвищення тривалості відпалу. Інакше кажучи, для кожної з достатньо високих температур відпалу характерна наявність деякої критичної швидкості охолодження V_{cr} , яка є границею між двома якісно різними типами поведінки сегрегації при зростанні тривалості відпалу. Залежність $V_{cr}(T_0)$ добре описується прямою лінією в координатах $\ln V_{cr} - T_0$ (рис. 6). Вище цієї лінії (в зоні I) зростання тривалості високотемпературного відпалу веде до підвищення рівня «заморожування» сегрегації; нижче цієї лінії (зона II) рівень «заморожування» зменшується зі збільшенням тривалості відпалу. Відмітимо, що значення V_{cr} не залежить від тривалості високотемпературного відпалу; це, в свою чергу, означає, що перехідна швидкість охолодження V_{cr} є границею, яка визначає дві зони сегрегації, в яких значення рівня «заморожування» сегрегації лежить або вище, або нижче рівноважного рівня сегрегації.

Врахування внеску в рівень сегрегації при високотемпературному відпалі двох основних факторів (неможливість досягнення рівноважного рівня в умовах обмеженої по тривалості ізотермічної витримки, а також прирощування сегрегації при охолодженні) дозволяє пояснити немонотонну температурну залежність сегрегації у полікристалі (як перше наближення при моделюванні електроліту ТОПК) і, таким чином, немонотонний температурний хід схильності матеріалу до міжзеренної крихкості. Описаний метод розрахунку дозволяє прогнозувати наявність інтервалів посилення міжзеренної крихкості в електроліті паливної комірки. Одним із способів використання запропонованого підходу може бути побудова розрахункових температурно-часових діаграм крихкості матеріалів.

Ця робота виконувалась за фінансової підтримки Національного космічного агентства України, CNES (Франція) і фонду INTAS в рамках проекту № 06-1000024-8748 «Структурна оптимізація паливних комірок на базі кераміки з диоксиду цирконію стабілізованого оксидом скандію для застосування на космічних апаратах».

1. Мовчан Б. А., Малашенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — Киев: Наук. думка, 1983. — 230 с.

2. Полетика И. М. Межкристаллитная адсорбция примесей и разрушение металлов. — Новосибирск: Наука, 1988. — 126 с.
3. Салганик Р. Л. Механика тел с большим числом трещин // Изв. АН СССР. Мех. твердого тела. — 1973. — № 4. — С. 149–158.
4. Слюняев В. Н., Луговой Н. И., Фирстов С. А. Зернограничная сегрегация в бинарном сплаве при термообработке: немонотонная температурная зависимость и влияние на межзеренную хрупкость // Металлофиз. новейшие технол. — 2007. — 29, № 4. — С. 451–469.
5. Устиновичков Ю. И., Банных О. А. Природа отпускной хрупкости сталей. — М.: Наука, 1984. — 240 с.
6. Утевский Л. М., Гликман Е. Э., Карк Г. С. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. — М.: Металлургия, 1987. — 224 с.
7. Atkinson A. Chemically-induced stresses in gadolinium-doped ceria solid oxide fuel cell electrolytes // Solid State Ionics. — 1997. — 95. — P. 249–258.
8. Atkinson A., Selcuk A. Mechanical behavior of ceramic oxygen ion-conducting membranes // Solid State Ionics. — 2000. — 134. — P. 59–66.
9. Brockenbrough J. R., Zok F. W. On the role of particle cracking in flow and fracture of metal matrix composites // Acta Metall. Mater. — 1995. — 43, N 1. — P. 11–20.
10. Chevalier J., Olagnon C., Fantozzi G. et al. Creep behaviour of alumina, zirconia and zirconia-toughened alumina // J. Eur. Ceram. Soc. — 1997. — 17, N 6. — P. 859–864.

11. Fischer W., Malzbender J., Blass G. et al. Residual stresses in planar solid oxide fuel cells // J. Power Sources. — 2005. — **150**. — P. 73–77.
12. Ghosh S., Moorthy S. Particle fracture simulation in non-uniform microstructures of metal-matrix composites // Acta Mater. — 1998. — **46**, N 3. — P. 965–982.
13. Gogotsi G., Lugovy M. Local stochastic analysis of microcracking and non-elastic behavior of ceramics // Theor. Appl. Fract. Mec. — 2001. — **36**. — P. 115–123.
14. Guo X. Physical origin of the intrinsic grain-boundary resistivity of stabilized-zirconia: Role of the space-charge layers // Solid State Ionics. — 1995. — **81**. — P. 235–242.
15. Huijismans J. P. P., Van Berkel F. P. F., Christie G. M. Intermediate temperature SOFC — a promise for the 21st century // J. Power Sources. — 1998. — **71**. — P. 107–110.
16. Hwang S.-L., Chen I.-W. Grain size control of tetragonal zirconia polycrystals using the space charge concept // J. Amer. Ceram. Soc. — 1990. — **73**, N 11. — P. 3269–3277.
17. Kiser M. T., Zok F. W., Wilkinson D. S. Plastic flow and fracture of particulate metal matrix composite // Acta Mater. — 1996. — **44**, N 9. — P. 3465–3476.
18. Kouzeli M., Weber L., San Marchi C. et al. Influence of damage on the tensile behaviour of pure aluminium reinforced with ≥ 40 vol. pct alumina particles // Acta Mater. — 2001. — **49**. — P. 3699–3709.
19. Lemaitre J. A course on damage mechanics. — Berlin: Springer-Verlag, 1992.
20. Liu C.-K., Chen T.-T., Chyou Y.-P. et al. Thermal stress analysis of a planar SOFC stack // J. Power Sources. — 2007. — **164**. — P. 238–251.
21. Lugovy M., Orlovskaya N., Berroth K. et al. Microstructural engineering of ceramic-matrix layered composites: Effect of grain size dispersion on single-phase ceramic strength // Comp. Sci. Technol. — 1999. — **59**, N 2. — P. 283–289.
22. Lugovy M., Podrezov Y., Slyunyaev V. et al. Fracture resistance and strength of two-phase WC-Ni alloy // Theor. Appl. Fract. Mec. — 1999. — **31**. — P. 85–90.
23. Lugovy M., Slyunyaev V., Orlovskaya N. et al. Apparent fracture toughness in Si₃N₄-based laminates with residual compressive or tensile stresses in surface layers // Acta Mater. — 2005. — **53**. — P. 289–296.
24. Lugovy M., Slyunyaev V., Subbotin V. et al. Crack arrest in Si₃N₄-based layered composites with residual stress // Comp. Sci. Technol. — 2004. — **64**, N 13–14. — P. 1947–1957.
25. Lugovy M., Slyunyaev V., Texeira V. Residual stress relaxation processes in thermal barrier coatings under tension at high temperature // Surf. Coat. Technol. — 2004. — **184**, N 2–3. — P. 331–337.
26. Nan C.-W., Clarke D. R. The influence of particle size and particle fracture on the elastic/plastic deformation of metal matrix composites // Acta Mater. — 1996. — **44**, N 9. — P. 3801–3811.
27. Podrezov Y., Lugovoy N., Slyunyaev V. et al. Statistical failure model of materials with micro-inhomogeneity // Theor. Appl. Fract. Mec. — 1997. — **26**. — P. 35–40.
28. Ralph J. M., Schoeler A. C., Krumpelt M. Materials for lower temperature solid oxide fuel cells // J. Mater. Sci. — 2001. — **36**. — P. 1161–1172.
29. Seah M. P. Grain boundary segregation // J. Phys. F: Metal Phys. — 1980. — **10**. — P. 1043–1064.
30. Selimovich A., Kemm M., Torrison T. et al. Steady state and transient thermal stress analysis in planar solid oxide fuel cells // J. Power Sources. — 2005. — **145**. — P. 463–469.
31. Shao S., Fan Z., Shao J. et al. Evolutions of residual stress and microstructure in ZrO₂ thin films deposited at different temperatures and rates // Thin Solid Films. — 2003. — **445**. — P. 59–62.
32. Singhal S. C. Review: Solid oxide fuel cells for stationary, mobile, and military applications // Solid State Ionics. — 2002. — **152–153**. — P. 405–410.
33. Tsoga A., Nikolopoulos P. Surface and grain-boundary energies in yttria-stabilized zirconia (YSZ-8 mol%) // J. Mater. Sci. — 1996. — **31**, N 20. — P. 5409–5413.
34. Will J., Mitterdorfer A., Kleinlogel C. et al. Fabrication of thin electrolytes for second-generation solid oxide fuel cells // Solid State Ionics. — 2000. — **131**. — P. 79–96.
35. Yakabe H., Baba Y., Sakurai T., et al. Evaluation of the residual stress for anode-supported SOFC // J. Power Sources. — 2004. — **135**. — P. 9–16.
36. Yamamoto O. Solid oxide fuel cells: fundamental aspects and prospects // Electrochim. Acta. — 2000. — **45**. — P. 2423–2435.

Надійшла до редакції 20.02.09

M. I. Lugovy, V. M. Slyunyaev, Ye. M. Brodnikovs'kyi, M. Brychevs'kyi, M. P. Brodnikovs'kyi, O. D. Vasyl'iev, R. Steinberger-Wilckens

CERAMIC FUEL CELLS FOR SPACE VEHICLES

The technological aspects of manufacturing planar solid oxide fuel cells (SOFC) with bearing anode on the basis of high conductive scandia-stabilized zirconia are considered. The results of our investigation of electron beam deposited scandia-stabilized zirconia-based electrolyte microcracking are presented. The topicality of such investigation is associated with the fact that electrolyte integrity is the prerequisite to reliability of SOFCs and their application in space vehicles. We discuss the mechanisms of SOFC component degradation via the decrease of their grain boundaries which is induced by impurity under operating conditions.

УДК 536.24

В. М. Батуркін

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

РОЗРОБКА НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТЕПЛОВИХ ТРУБ ДЛЯ КОСМІЧНОЇ ГАЛУЗІ В РАМКАХ ПРОЕКТУ ІНТАС–КНЕС–НКАУ

Представлено огляд основних результатів міжнародного проекту № 06-100024-8916 в рамках співробітництва між Французьким центром з космічних досліджень (КНЕС), Міжнародною асоціацією сприяння співробітництву з науковцями нових незалежних держав — колишніх республік Радянського Союзу (ІНТАС) і Національним космічним агентством України (НКАУ) в галузі космічних систем терморегулювання. Головне питання проекту — це всебічне дослідження сучасних теплових труб з поздовжніми канавками.

ВСТУП

Широке застосування теплових труб (ТТ) в системах терморегулювання (СТР) космічної апаратури обумовлене автономністю їхнього функціонування, що не вимагає для цього витрат енергії і використання механічних поводів [2, 6, 13, 20, 22, 34, 37, 55, 56]. При досить невеликому перепаді температур між зонами підведення та відведення тепла в умовах зниженої гравітації теплові труби забезпечують передачу теплових потоків на рівні 100–600 Вт·м, що є альтернативою рідинних охолоджувальних контурів із використанням механічних насосів. При цьому ефективність теплообміну внутрішніх процесів в ТТ у діапазоні робочих температур від –60 до +80 °С, який є найбільш запитаним у космічній галузі, складає 2–40 кВт/(м²К), що забезпечує сумарний термічний опір теплових труб до 0.1 К/Вт. Особливо важливими для СТР космічної апаратури є конструкції ТТ, виготовлені із алюмінієвих сплавів (матеріал корпусу АД-31 за ГОСТ 4784-97 або схожий за складом сплав 6060 згідно із стандартом США AMS 4116, або сплав ALMgSi0.5-3.3206 за німецьким стандартом DIN1747) з поздовжніми канавками та аміаком як робочою рідиною. Перевагою цього типу ТТ, крім мінімальної маси (діапазон 0.1–

0.5 кг/м у залежності від діаметра та конструкції додаткових кріпильних деталей), полягає у можливості виготовлення за допомогою екструзії різноманітних конфігурацій поздовжніх канавок (прямокутних, трапецієподібних, омегаподібних та ін.), які є капілярною структурою ТТ. Окрім того, метод екструзії дає можливість виготовляти різноманітні форми перерізу ТТ, що дозволяє конструювати корпус ТТ із досить складною конфігурацією, адаптованою до вирішення конкретного технічного завдання. Типові профілі ТТ із алюмінієвого сплаву наведені на рис. 1.

Такі якості ТТ, а також малий термічний опір сприяли широкому застосуванню ТТ як в СТР окремих приладів, так і для конструювання теплових мереж значної протяжності (до 6 м з діаметром одиначної теплової труби 0.012–0.016 м) для забезпечення теплового режиму космічного апарата або вузла.

За рівнем інтеграції ТТ в апаратуру космічного апарата системи охолодження і терморегулювання умовно поділяються на такі групи (рис. 2): а) теплові труби, що використовуються для забезпечення теплового режиму елемента приладу або частини приладу. Теплові труби мають обмежений за розмірами поверхні тепловий інтерфейс з тепловідляючим елементом або з частиною приладу. Тепловий режим всього приладу

забезпечується іншими системами теплового контролю; б) теплові труби, що служать для забезпечення теплового режиму одиничного блока апаратури. Теплові труби мають обмежений за розмірами поверхні тепловий інтерфейс із блоком. СТР забезпечують тепловий режим блока в цілому; в) теплові труби, що є частиною конструкції електронного приладу або електронної плати і використовуються для монтажу електронного устаткування. СТР на основі ТТ забезпечують тепловий режим блока; г) теплові труби, що створюють ізотермічну поверхню (посадкове місце) для установки приладів і устаткування. Тепловий режим приладу забезпечується

або додатковою системою теплового контролю або системою на основі теплових труб; д) теплові труби, що утворюють теплову мережу для обміну тепловою енергією між частинами об'єкта або блоками. Тепловий режим приладів забезпечується або спільною роботою системи теплового контролю кожного приладу або централізованою системою на основі теплових труб; е) теплові труби, що утворюють ізотермічний корпус (оболонку, поверхню), в якому перебуває прилад. Тепловий режим приладу забезпечується системою на основі теплових труб.

Кожний із варіантів інтегрування ТТ має свої теплотехнічні та конструктивні особливості.

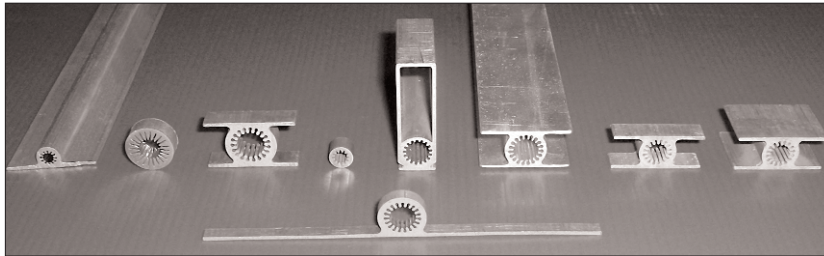


Рис. 1. Приклади конфігурацій профілів теплових труб з поздовжніми канавками для космічного устаткування [47]

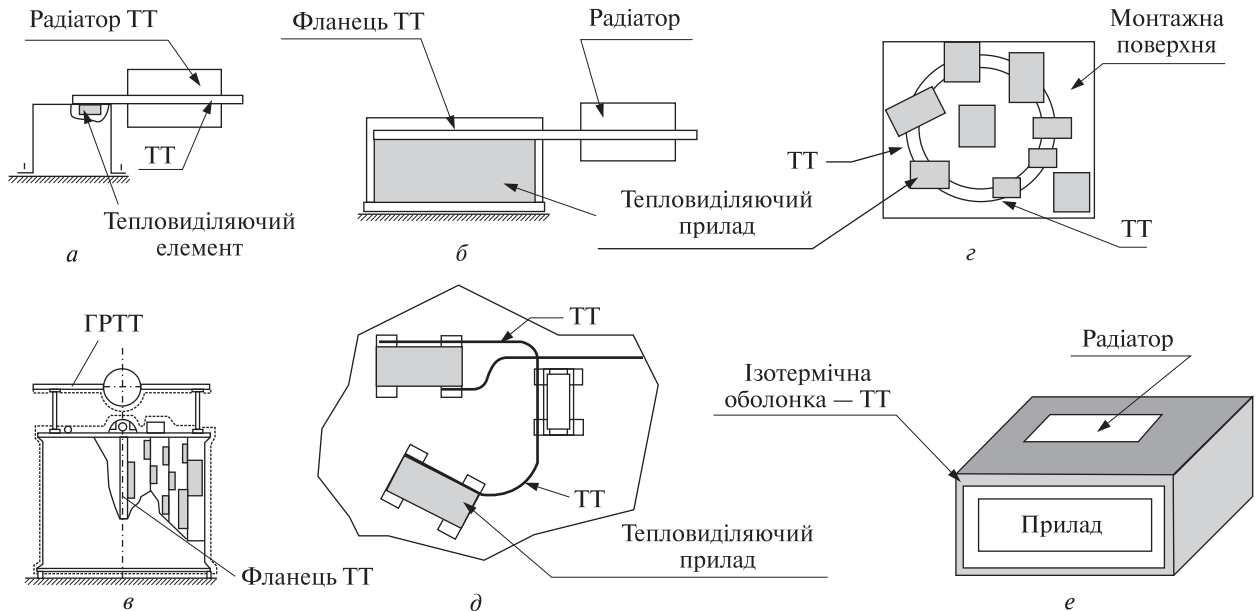


Рис. 2. Класифікація систем охолодження та терморегулювання за ступенем інтегрування теплових труб у конструкцію приладу. ГРТТ — ТТ змінного термічного опору

Постійний розвиток теорії та практики у конструюванні ТТ для транспортування теплової енергії (варіанти ε та δ на рис. 2) спрямований на збільшення передачі теплового потоку у межах заданого геометричного розміру перерізу (типовий діаметр теплової труби 0.008—0.02 м), збільшення щільності теплового потоку, зниження термічного опору та підвищення ресурсу ТТ у космосі (типово понад 20000 год), що базується на поглибленому вивченні механізмів тепломасообміну. Роботи [2, 4, 6, 13, 20, 22, 24, 34, 36, 37, 45, 48, 50, 54, 55, 56, 59] висвітлюють прогрес, якого зазнали конструкції теплових труб з поздовжніми канавками за останні 30 років за величиною передавального теплового потоку, яка досягає 1400 Вт·м для ТТ з діаметром 0.025 м [36] та 150—250 Вт·м для найбільш прийняттого діаметра 0.012—0.014 м [24, 54, 59]. Постійний розвиток технології та розширення об'ємів впровадження у космічній галузі теплових труб з поздовжніми канавками (системи охолодження для телекомунікаційних геостационарних супутників, системи терморегулювання наукових приладів та обладнання космічного апарата) потребує вирішення питань тепломасообміну та зменшення термічного опору теплових труб. З метою подальшого вирішення цих питань та розвитку кооперації європейських розробників та дослідників теплових труб цього типу, ІНТАС (Міжнародна асоціація сприяння співробітництву з науковцями незалежних держав — колишніх республік Радянського Союзу) спільно з Французьким центром з космічних досліджень (КНЕС) та Національним космічним агентством України (НКАУ) був проведений конкурс науково-технічних проектів. Цей дворічний проект передбачав поглиблене вивчення процесів у теплових трубах для космічної галузі, на основі експериментального та теоретичного дослідження найновіших профілів теплових труб виробництва Thales Alenia Space (TAS) з Франції, Euro Heat Pipes S.A. (EHP) з Бельгії та НТУУ «КПІ» (Україна). В проекті також брали участь провідні науково-технічні заклади, які мають багаторічний досвід вивчення процесів у теплових трубах: Інститут тепломасообміну (ІТМО) Ака-

демії наук Республіки Білорусь у м. Мінськ, лабораторія теплових проблем у Національному дослідному центрі Франції у м. Футуроскоп (LET CNRS) та лабораторія теплових труб (НТУУ «КПІ») у м. Києві.

СТАН СУЧАСНИХ УЯВЛЕНЬ ПРО ТЕПЛОМАСООБМІН У ТЕПЛОВИХ ТРУБАХ З ПОЗДОВЖНІМИ КАНАВКАМИ

Аналіз сучасних літературних джерел показав, що зусилля дослідників сконцентровані на вирішенні таких проблем: а) розробка модельних уявлень для визначення теплопередавальної спроможності теплових труб з поздовжніми канавками прямокутної та омега-подібної форми [4, 9, 10, 20, 22, 34, 40, 44, 50, 51]; б) дослідження тепломасообміну у зоні підводу тепла [31, 33, 42, 43, 46, 52, 53, 58, 64]; дослідження тепломасообміну у зоні відводу тепла [23, 32, 53]; в) пошук шляхів підвищення теплового потоку як за допомогою профілювання каналу канавок [23, 26, 41, 59], так і зменшення термічного опору за рахунок нанесення додаткового пористого шару на поверхню канавок [25, 27] або інших засобів.

Аналіз моделей для розрахунку теплопередавання потоку у роботах [4, 10, 16, 20, 22, 34, 40, 44, 50, 51] показує, що вони базуються на рівняннях балансу тиску вздовж лінії руху теплоносія. Порівняння тиску, що створює капіляр канавки та втрати тиску при русі теплоносія вздовж канавки та у паровому каналі, гідростатичний напір, підгальмовуючий напір за рахунок взаємодії зустрічних рухів пари та рідини дає оцінку максимального теплового потоку, який транспортує кожна канавка. Аналіз восьми відомих моделей [4, 10, 16, 20, 22, 34, 40, 44] показав різні підходи до визначення ефективного радіуса канавок. Відношення максимального і мінімального значення втрат тиску за рахунок тертя рідини може досягати 2.1 при використанні різних методик визначення опору канавки рухові рідини. Втрати тиску за рахунок тертя пари теплоносія для ламінарного режиму руху визначаються усіма моделями однаково, але для турбулентного режиму, для якого використову-

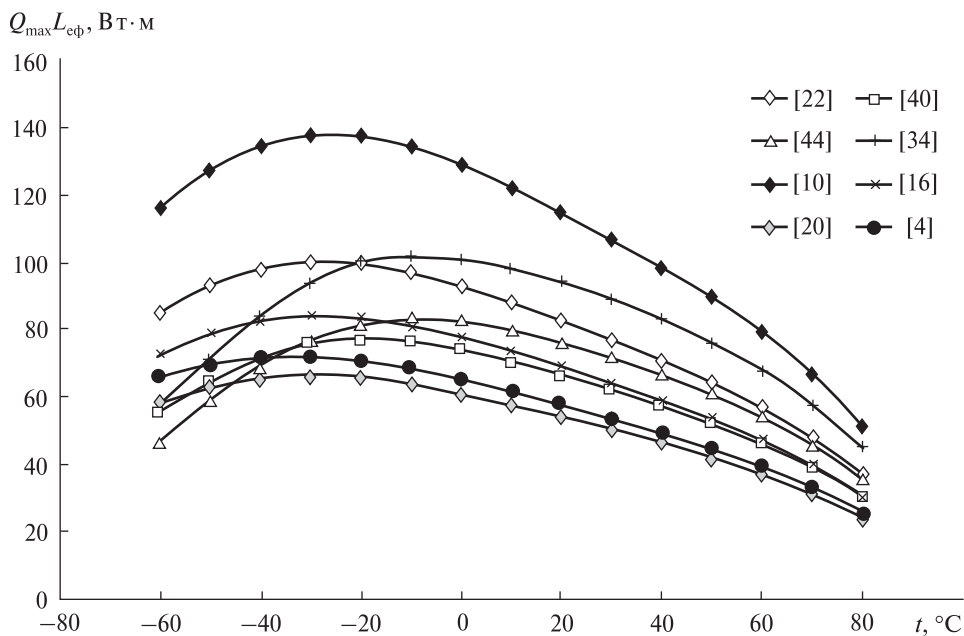


Рис. 3. Розрахунок максимального теплового потоку для ТТ конструкції [5, 29] з ефективною довжиною $L_{\text{эф}} = 1$ м у діапазоні експлуатації від -60 до $+80$ °C

валились різні коефіцієнти тертя, має місце розбіжність до 20 %. Втрати тиску за рахунок взаємодії потоків пари та рідини визначаються як частина втрат тиску у парі або у рідині, і розбіжність у їхніх значеннях сягає 2.4. Найбільший внесок у сумарні втрати тиску при горизонтальній орієнтації теплових труб з поздовжніми канавками дають втрати тиску при русі рідини по канавці та взаємодії потоків рідини та пари. Остання величина є суттєвою при низьких температурах (від -60 до -40 °C). Таким чином, різні моделі розрахунку теплопередавальної спроможності теплових труб дають розбіжності, що приводить до різниці між максимальним та мінімальним значенням величини $Q_{\text{max}} L_{\text{эф}}$ до 2.5 разів (див. рис. 3). При використанні нових конфігурацій канавок ці розбіжності можуть ще збільшитися. Доробка фізичних моделей та їхня експериментальна перевірка є актуальною задачею теорії та практики теплових труб. Факторами, які вимагають вивчення, є вплив реальної геометрії капіляра на втрати тиску, вплив розмірів калюжі теплоносія, вибір характерного розміру канавки, що забезпечує капілярний напір

для руху теплоносія, та питання гідравлічного зв'язку канавок теплової труби.

Сучасні моделі для розрахунку коефіцієнта теплообміну у зонах нагріву та конденсації базуються на знаходженні профілю плівки рідини. У роботі [51] зроблено висновок, що зона мікроплівки у меніску рідини має довжину лише декілька мікрон, але у цьому місці до парового простору передається до 40 % енергії. Щільність теплового потоку у цій зоні досягає 5 МВт/м^2 . Всі розрахунки зроблено для прямокутних та омегаподібних канавок. Сучасні моделі поки що дають ненадійні значення цих коефіцієнтів, які можна було б використовувати на практиці. Тому подальша розробка моделей та зіставлення з адекватним експериментом є актуальним питанням. Експериментальні дані показують суттєві відмінності для канавок навіть дуже близьких конфігурацій. Це пов'язано із відсутністю єдиної методики проведення експериментів та обробки результатів. Порівняння експериментальних значень коефіцієнта теплообміну α у зоні теплопідводу, отриманого у широкому діапазоні тестувань для космічного використання

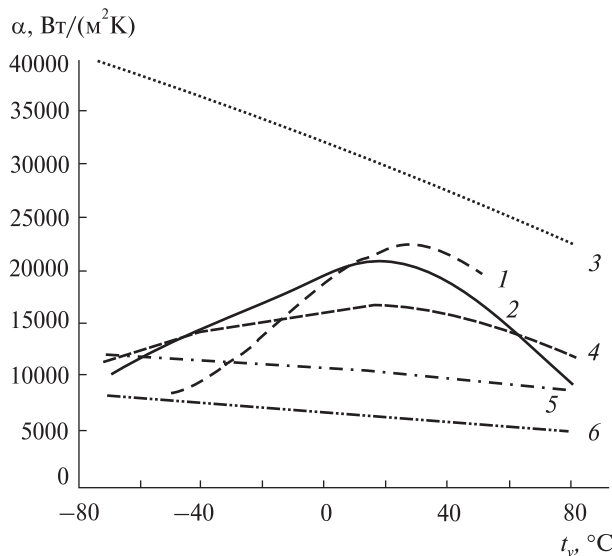


Рис. 4. Значення коефіцієнтів теплообміну α у зоні нагрівання канавкової теплової труби, отримані на основі експериментальних даних (криві 1 [30], 2 [49]) та моделювання (криві 3–6 [47, 52]). Дані НТУУ «КПІ» (крива 1) віднесені до діаметра парового каналу і довжини зони теплопідводу

від -60 до $+80$ °С, показує, що одна з найбільш відпрацьованих моделей теплообміну у мікроплівках канавок [57] (крива 3) дає суттєві розбіжності із іншими даними (рис. 4).

Коефіцієнти теплообміну у зоні конденсації канавкових теплових труб теж мають розбіжності у кілька разів. У роботі [53] на основі розробленої моделі теплообміну також запропоновані технологічні прийоми, які повинні підвищити інтенсивність теплообміну у цій зоні за рахунок зменшення товщини рідинної плівки на верхівках міжканальних перетинок.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ КАНАЛІВ КАНАВОК СУЧАСНИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБ

Втрати тиску при русі теплоносія по канавках теплової труби є найвагомішою складовою серед усіх компонентів балансу тиску, і тому вивчення цих втрат є актуальним питанням теорії та практики використання канавкових тепло-

вих труб. У проєкті були поставлені задачі експериментально визначити гідравлічний опір канавок кожного типу, які застосовуються провідними розробниками ТТ у Європі, та перевірити модельні уявлення про розрахунки гідравлічного опору, що використовуються на практиці, а також провести порівняння експериментальних даних із результатами чисельного моделювання.

Найпопулярніша одновимірною модель стабілізованого руху рідини в каналі довільного профілю побудована на рівнянні Гагена — Пуазейля з використанням поняття гідравлічного діаметра каналу d_h . Так, згідно з інструкцією до програми ESATAN/FHTS (розробник Alstom Aerospace, Велика Британія), якою користується європейська наукова спільнота для розрахунків космічних систем охолодження [38], втрати тиску ΔP на подолання сил тертя при русі нестискуваної рідини в каналах довільної конфігурації розраховуються за формулою

$$\Delta P_l = f_l \frac{l}{d_h} \rho_l \frac{w^2}{2}; \quad d_h = \frac{4A}{\Pi}, \quad (1)$$

де w , ρ_l , d_h , l , A , Π — середня швидкість, густина рідини, гідравлічний діаметр каналу, його довжина, поперечний переріз і периметр відповідно, f_l — коефіцієнт опору тертя. Для ламінарного режиму течії рідини

$$f_l = k / \text{Re}_l, \quad (2)$$

$$\text{Re} = \frac{G d_h}{A \mu_l} = \frac{d_h \bar{w}}{\nu_l}, \quad \bar{w} = \frac{G}{A \rho_l} = \frac{Q}{A r \rho_l},$$

де k — коефіцієнт форми каналу, в даній методиці $k = 64$ для круглої труби, G — масова витрата, μ_p , ν_l — динамічний і кінематичний коефіцієнти в'язкості, r — прихована теплота пароутворення рідини, Q — тепловий потік. Але відомо, що для каналів некруглого перерізу коефіцієнт k може значно відрізнятись від значення 64 [18]. Аналітичне визначення коефіцієнта k для каналів різних форм було зроблено в проєкті на основі одно- [38], дво- [28, 60] і тривимірних [1] моделей каналів та експериментально.

Двовимірною модель стабілізованого руху рідини в каналі канавки довільного профілю базу-

ється на розв'язанні рівняння Нав'є—Стокса для швидкості $w(x, y)$ уздовж однієї осі руху z :

$$\mu_l \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu_l \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (3)$$

Граничні умови для цього рівняння такі: $w = 0$ на поверхні контакту рідини та стінки канавки. Умови дотичного напруження для міжфазної поверхні рідина — пара при довільному режимі течії пари теплоносія мають вигляд $\mu_l \frac{\partial w}{\partial n} = -f_v \cdot \rho_v \cdot \bar{w}_v^2 / 8$, де f_v , ρ_v , \bar{w}_v — коефіцієнт опору тертя пари, густина пари та середня швидкість пари, n — напрямком нормалі до поверхні рідини — пара.

При чисельному розв'язанні рівняння (3) використовувалися програми HEAT-90 розробки НТУУ «КПІ» [30] і TAS (Harvard Thermal, США) [60].

Тривимірний модель стабілізованого руху рідини у канавці довільного профілю базується на повномасштабному вирішенні рівняння Нав'є — Стокса для трьох складових швидкості $w(x, y, z)$ по всіх осях із врахуванням зони початкової гідродинамічної стабілізації. Детальний опис спрощень приведено у роботі [1].

При моделюванні геометрії каналів і корпусу ТТ базувалися на припущенні про ідеальні форми перерізу канавок, які бралися із креслень виробників профілів ТТ. Проте проведені нами вимірювання реальних виробів виявили деякі відхилення від заявлених розмірів і форми профілю перерізу, що, вочевидь, є наслідком особливостей процесу екструзії. Відхилення у формі і розмірах перерізу капілярних каналів приводить до невизначеності вихідних даних у розрахункових моделях і, отже, до необхідності експериментального визначення гідравлічних характеристик капілярної структури.

При моделюванні руху рідини в канавці її контакт із паровим об'ємом замінювався на контакт із твердою стінкою, що дещо відрізняється від реальних умов течії в ТТ, але відповідає умовам проведення експериментальних досліджень.

Для виконання експериментальної частини цього завдання розроблено стенд для прове-

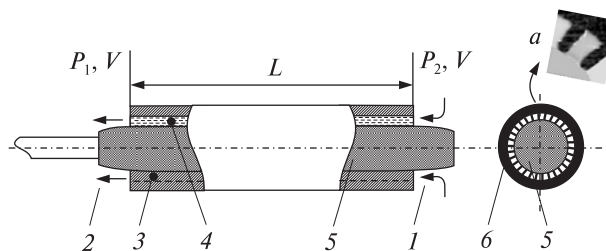


Рис. 5. Схема експерименту для вимірювання гідравлічного опору канавок теплових труб: 1 — вхід рідини, 2 — вихід рідини, 3 — перетинка між канавками, 4 — канавка, 5 — витискне тіло, 6 — корпус теплової труби; а — збільшений вигляд контакту верхівок канавок та витискного тіла

дення вимірювань витрат рідини V при її русі по канавках досліджуваного профілю ТТ та перепаді тиску ΔP . Схема цього експерименту має наступний вигляд. По канавкам зразка оболонки корпусу теплової труби пропускається потік рідини з об'ємною витратою V та фіксується втрата тиску $P_2 - P_1$ (рис. 5). Змінюючи значення перепаду тиску ΔP , отримують залежність $V = f(\Delta P)$. Для проведення експерименту стенд має систему підготовки та подачі рідини, систему вимірювання перепаду тиску та систему вимірювання температури. Технічні особливості виконання робочої ділянки пов'язані із необхідністю примусити рідину рухатися тільки по каналах канавок. Це досягається за допомогою витискного тіла, яке має механічний контакт із верхівками перетинок між канавками. Оскільки корпус ТТ та канали мають геометричні допуски, витискне тіло повинно бути гнучким та заповнювати щілини по довжині зразка ТТ.

Також важливо було виключити вплив всіх паразитних гідравлічних опорів, які можуть виникнути в експериментальній установці (при підводі і відводі рідини, втрати тиску на тертя у циркуляційному контурі і нестабільність температури). Загальний вигляд досліджуваних профілів ТТ приведено на рис. 6. Ці профілі є типовими для використання у теплових трубах: прямокутні (КПІ BIRD), трапецієподібні (Thales Alenia Space), Ω -подібні (КПІ КРА та Euro Heat Pipes).





	Труба № 1 — зразок «КПІ BIRD»		Труба № 3 — зразок «КПІ КРА»
	Труба № 2 — зразок «Thales Alenia Space»		Труба № 4 — зразок «Euro Heat Pipes»

Рис. 6. Загальний вигляд досліджуваних профілів теплових труб

Експерименти проводилися у діапазоні перепадів тиску 1000—2400 Н/м² та витрати рідини 10⁻⁶ — 10⁻⁵ м³/с (використовувалася дистильована вода) у діапазоні температур 20—28 °С. Ці умови забезпечували режим ламінарної течії рідини у канавці (критерій $Re < 680$).

Розрахунки коефіцієнта k , отримані на основі експериментальних даних, а також розрахунки витрати рідини при даному перепаді тиску дають можливість визначити значення цього коефіцієнта для всіх досліджуваних профілів. Узагальнення розрахункових та експериментальних даних приведено на рис. 7.

Видно, що дво- та тривимірні моделі відображають реальний закон зміни коефіцієнта k залежно від конфігурації перетину канавки. Одно-вимірні моделі [38] повинні враховувати реальне значення коефіцієнта k при визначенні втрат тиску у рівнянні (2). Для цього цей коефіцієнт обчислюється на основі 2(3)-вимірної моделювання або експериментально. У наших тестуваннях експериментальні дані відрізняються від модельних для 4 типових видів канавок на 4—30 %.

РОЗРОБКА БАЗИ ДАНИХ ПРО ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АМІАКУ

Аміак найчастіше використовують як теплоносій у космічних теплових трубах. Його теплофізичні властивості неоднократно вивчалися [3, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 18, 19, 22, 39, <http://webbok.nist.gov/chemistry/fluid/>], але вибір найдостовірніших даних для подальшого використання вимагає їхнього порівняння та відсіву помилкових даних. Також суттєвим є те, що більшість вихідних даних представлено у табличній формі, а для використання у розрахунках найзручнішими є аналітичні залежності (див. [39]). Метою даного

розділу проекту було порівняння експериментальних даних про властивості аміаку, перевірка апроксимаційних формул, наведених у роботі [39] та побудова нових апроксимаційних залежностей. Аналізувались теплофізичні властивості аміаку: тиск, густина рідини та пари на лінії насичення, ентальпія рідкого та пароподібного аміаку, прихована теплота пароутворення r , питома масова теплоємність, динамічна і кінематична в'язкість ν , теплопровідність, число Прандтля рідкої та парової фази, коефіцієнт поверхневого натягу σ та коефіцієнт об'ємного розширення. Досліджувався температурний діапазон 200—380 К, парова та рідинна фази перебували на лінії насичення. Аналіз робіт [3, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 18, 19, 22, 39, <http://webbok.nist.gov/chemistry/fluid/>] показав серйозні розбіжності. Так, наприклад, значення кінематичної в'язкості рідини (рис. 8) відрізняються на 50 %, і достовірними слід вважати дані [12, 18, <http://webbok.nist.gov/chemistry/fluid/>], а дані [22] — недостовірними. Значення параметра $N = \sigma r / \nu$ (Вт/м²), що характеризує можливості транспорту тепла за допомогою теплових труб, суттєво відрізняються за даними [7, 8, 10, 18, 34, 39, <http://webbok.nist.gov/chemistry/fluid/>], і тому вимагають ретельної перевірки (рис. 9).

Було встановлено, що жодне із відібраних літературних джерел не дає надійної інформації про всі необхідні теплофізичні властивості, і базу даних потрібно будувати, комбінуючи дані із різних джерел. Вони і лягли в основу апроксимаційних залежностей вигляду

$$A = B + C \cdot T_2 + D \cdot (S - T_2)^n + E \cdot (S - T_2)^k + \dots + F(S - T_2)^m, \quad (4)$$

де A — значення теплофізичної властивості для рідини або пари; B, C, D, E, F, S — константи рівняння, які підбираються за допомогою мето-

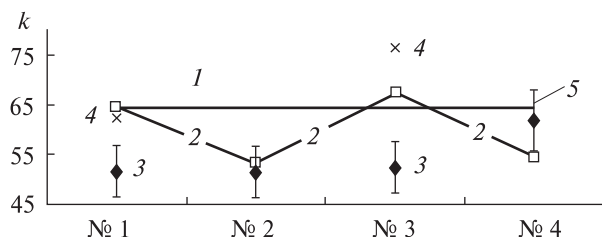


Рис. 7. Значення коефіцієнта k для труб №№ 1–4: 1 — розрахунки за одновимірною моделлю, 2 — розрахунки за дво- та тривимірними моделями, 3 — експериментальні значення, 4 — значення по [18] для прямокутних каналів при відношенні сторін 2:1 (профіль № 1) та 5:1 (для профілю № 2 маємо 3.5:1), 5 — похибка експерименту, пов'язана з коливанням температури

ду найменших квадратів; n, k, \dots, m — коефіцієнти полінома; T_2 — безрозмірна температура на лінії насичення.

По цьому розділу проекту можна зробити такі висновки. Дані [10] про властивості аміаку на лінії насичення не рекомендується брати для використання. Більшість залежностей теплофізичних властивостей аміаку, отриманих у роботі [39], збігається із табличними даними [3, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 18, 19, 22, 39, <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>]. Отримані залежності апроксимацій дозволяють знайти значення теплофізичних властивостей аміаку у досить широкому температурному діапазоні 200–380 К, і похибка визначення параметрів аміаку за допомогою розроблених апроксимаційних формул не перевищує 10 %, а для багатьох властивостей (тиск насичення, густина рідкої фази, тощо) — 5 %. Для подальшого практичного використання створено базу даних, розроблено апроксимаційні залежності. Розраховані помилки апроксимації були узагальнені у вигляді файлу формату *.xls.

РОЗРОБКА МОДЕЛІ МАСОПЕРЕНОСУ У КАНАВКОВІЙ ТЕПЛОВІЙ ТРУБІ

На основі аналізу моделей тепломасопереносу у тепловій трубі, проведеного вище, за вихідну було взято модель, запропоновану у роботах [34] та [29] з подальшою модифікацією, яка полягала у тому, що враховується вплив надлишку теплоносія на теплопередавальні характеристики теп-

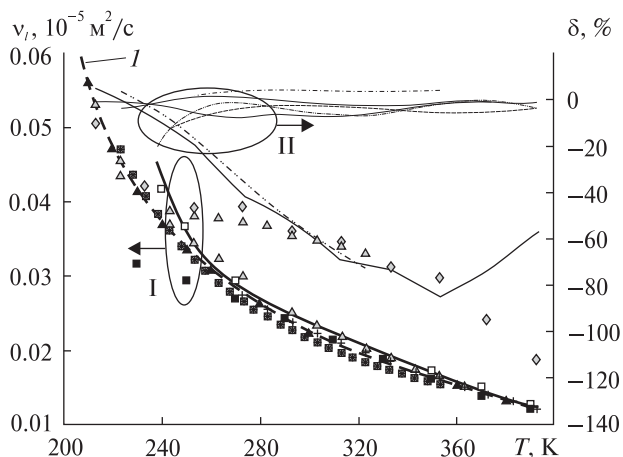


Рис. 8. Значення кінематичної в'язкості ν_i рідини (група I) за різними даними та відносна похибка апроксимації δ (група II) відносно запропонованої апроксимації (крива I)

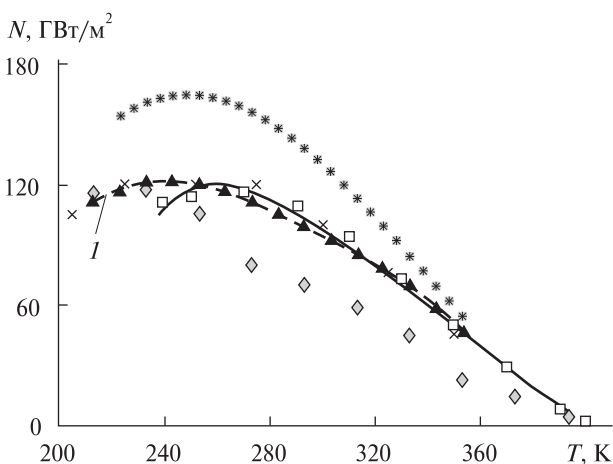


Рис. 9. Значення теплотранспортного параметра N для аміаку за різними даними; I — запропонована апроксимація

лової труби. У тому випадку, коли у трубі є надлишок теплоносія, під дією сил гравітації він накопичується у нижній частині ТТ, утворюючи так звану калюжу. Ця калюжа може перекривати одну або декілька нижніх канавок, за рахунок чого змінюються як умови теплообміну у паровому каналі, так і умови транспорту теплоносія по цих канавках. Були прийняті такі припущення: тепла труба працює у стаціонарному режимі, і температура пари і рідини у зонах нагріву,

транспорту і конденсації приймається постійною, режим руху рідини у канавках є ламінарним, а режим руху пари у каналі може бути ламінарним, турбулентним або перехідним. Втрати тиску за рахунок тертя зустрічних потоків пари та рідини розраховуються як частина втрат тиску у парі, густина теплового потоку у зонах нагріву і конденсації постійна по периметру та по довжині. Поверхня рідини у калюжі формується під дією тільки сил гравітації. Теплова труба займає або горизонтальне положення, або зона конденсації розташована нижче зони нагріву, а канавки є гідравлічно незалежними, крім тих, які перекриваються калюжею. Для кожної канавки використовується рівняння балансу тиску у вигляді

$$P_{cap} \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_h + \Delta P_{l-v}, \quad (5)$$

де P_{cap} — капілярний тиск, створюваний капіляром канавки, ΔP_l — втрати тиску за рахунок руху рідини у канавці, ΔP_v — втрати тиску у парі за рахунок руху пари по паровому каналу, ΔP_h — втрати тиску за рахунок дії сили тяжіння, ΔP_{l-v} — втрати тиску за рахунок тертя рідини та пари при зустрічному русі.

Визначення перепадів тиску провадиться за допомогою наступних рівнянь. Втрати тиску у рідині визначаються із урахуванням того, що при наявності калюжі довжина фільтрації рідини по канавці зменшується. Канавка умовно поділяється на дві частини: перша — вільна від калюжі, друга — перекрита калюжею. Тоді втрати тиску у рідині для k -ї канавки на ділянці транспортування тепла визначатимуться за формулою

$$\Delta P_l = \frac{k\mu_l Q_k}{32r \frac{A_g^3}{\Pi_g^2} \rho_l} (l_{hp} - l_{p_k}) + \frac{2\mu_l Q_k}{r \left(\frac{A_g^3}{\Pi_g^2} + \frac{A_p^3}{n\Pi_p^2} \right) \rho_l} l_{p_k}, \quad (6)$$

де Q_k — тепловий потік, що передається k -ю канавкою; A_g , Π_g — площа та периметр змочування канавки відповідно; A_p , Π_p — площа та пери-

метр змочування калюжі теплоносія у середньому перерізі; n — кількість канавок, які знаходяться під калюжею; l_{p_k} — довжина, на яку калюжа перекриває k -ту канавку, l_{hp} — загальна довжина канавки.

При розрахунку втрати тиску у парі також враховується вплив калюжі. Внаслідок того, що калюжа перекриває частину перерізу для проходження пари, швидкість пари збільшується, внаслідок чого втрата тиску у парі також збільшується. При розрахунку використовується швидкість у середньому перерізі каналу над калюжею. Тоді для ділянки транспортування тепла

$$\Delta P_v = \frac{2Fa_v Q^2}{D_{hv} A_v^2 r^2 \rho_v} (l_{hp} - l_p) + \frac{2Fa_{vp} Q^2}{D_{hvp} (A_v - A_p)^2 r^2 \rho_v} l_p, \quad (7)$$

де Q — загальний тепловий потік, що передається ТТ; D_{hv} — гідравлічний діаметр парового каналу там, де калюжа відсутня; D_{hvp} — гідравлічний діаметр парового каналу там, де є калюжа теплоносія; A_v — площа парового каналу; Fa — параметр, що залежить від режиму руху пари у каналі, інерційна складова не враховується. Втрати тиску за рахунок дії сил тяжіння складають

$$\Delta P_h = \rho_l g Z_{mg} = f(h, \alpha), \quad (8)$$

де Z_{mg} — висота рівня меніска канавки відносно нульового рівня (за нульовий рівень у даному випадку приймається поверхня дзеркала калюжі теплоносія); α — кут нахилу осі труби до горизонту. Для замикання рівнянь балансу втрат тиску додавалися рівняння для геометрії калюжі теплоносія. Визначення розмірів калюжі проводилося на основі балансу маси теплоносія, що міститься у ТТ та у канавках, у калюжі та у паровому просторі $m_{NH_3} = m_{l,g} + m_{l,p} + m_v = \text{const}$. Кожна із складових балансу маси є функцією геометричних параметрів ТТ, нахилу відносно сил гравітації та температури насичення (яка лежить у межах температурного діапазону експлуатації теплової труби). В залежності від комбінації цих параметрів можливі дві конфігурації калюжі — поперечний переріз у формі трапеції або прямо-

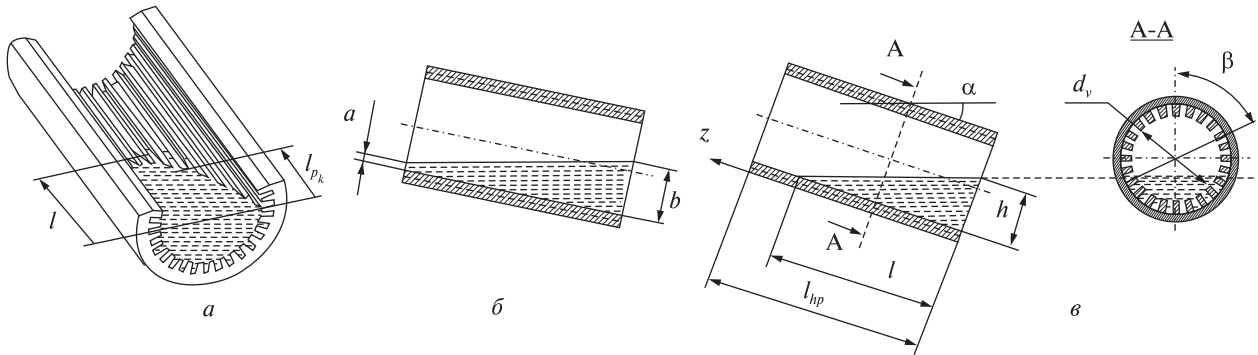


Рис. 10. Загальний вигляд калюжі теплоносія у ТТ (а) та можливі її форми у центральному поздовжньому перерізі ТТ: трапецієподібна (б) та трикутна (в)

кутника (при горизонтальній орієнтації (рис. 10, б)) та у вигляді трикутника (рис. 10, в).

Для цих варіантів форми калюжі були запропоновані аналітичні залежності, які дозволяють отримати значення геометричних параметрів калюжі. Наприклад, для трикутної конфігурації справедливі такі співвідношення для об'єму калюжі V_p , який визначається із балансу маси теплоносія:

$$V_p = \text{ctg}\alpha \cdot \frac{d_v^3}{8} \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{d_v - 2h}{d_v}\right)^2} - \frac{d_v - 2h}{d_v} \cdot \arccos\left(\frac{d_v - 2h}{d_v}\right) - \frac{1}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{d_v - 2 \cdot h}{d_v}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}} \right], \quad (9)$$

де d_v — діаметр парового каналу, h — висота калюжі.

Розв'язання даного рівняння виконується відносно розміру h методом послідовних ітерацій, і далі вираховується довжина калюжі l ($l = h \cdot \text{ctg}\alpha$, де α — кут нахилу ТТ до горизонту), кількість канавок, які перекриваються калюжею (канавки, які лежать усередині кута 2β) і довжина кожної канавки, яка блокована калюжею. Складніші аналітичні залежності отримано для інших варіантів конфігурації калюжі. Моделювання довжини та товщини калюжі для заповнення ТТ аміаком, які тестувалися у проєкті,

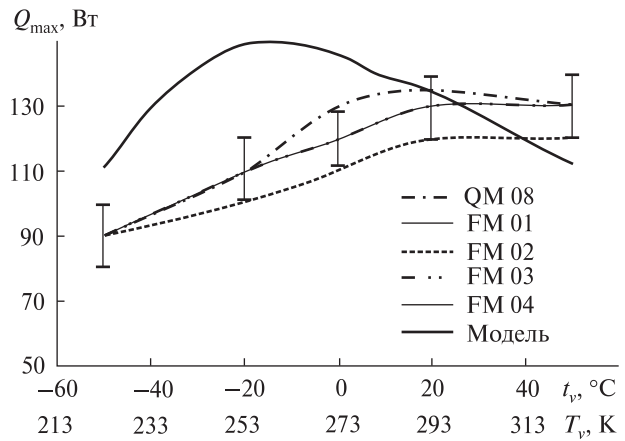


Рис. 11. Максимальний тепловий потік Q_{max} та похибки його визначення для теплових труб з прямокутними поздовжніми канавками (профіль КПІ «BIRD») у діапазоні температури експлуатації $-50...+60$ °C

показує, що у випадку надлишку теплоносія калюжа має розміри, близькі до довжини ТТ, і її вплив враховувався при розрахунках теплової спроможності ТТ при тестуванні в умовах гравітації. Наприклад, для теплової труби довжиною 1 м, з омега-подібними канавками, заповненої аміаком для номінального рівня температур 20 °C, при стандартному тестуванні — вивченні впливу перевищення зони нагріву над зоною конденсації Δh у діапазоні 0—0.01 м у наземних умовах при температурі пари 70—80 °C, калюжа матиме глибину $h = 0.002—0.004$ м та довжину 0.4—0.8 м. Вплив калюжі з таким розміром може суттєво збільшити значення отри-

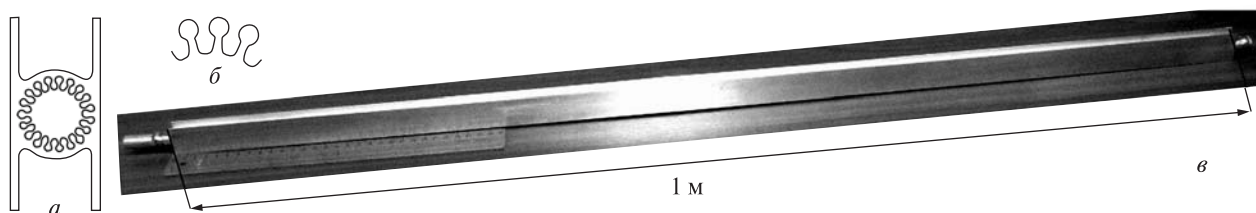


Рис. 12. Схема профілю АС-КРА 7.5-Р2 (а), вигляд Ω -подібних канавок (б) та однієї з виготовлених теплових труб (в)

маного експериментально максимального теплового потоку.

Доопрацювання узагальненої моделі для розрахунку теплової спроможності теплових труб ще повинне продовжуватися. Аналіз і порівняння значного масиву експериментальних значень $Q_{\max} \cdot L_{\text{еф}}$, отриманих при наземному відпрацюванні ТТ розробки НТУУ «КПІ» для німецького супутника BIRD згідно з європейським стандартом ESA PSS-049 [5] та розробленої моделі показали, що обидві функціональні залежності мають різні значення температури пари, при яких досягається максимум теплової спроможності. У моделі спостерігається прив'язка максимуму величини $Q_{\max} \cdot L_{\text{еф}}$ до максимуму параметра N для аміаку (рис. 9 та 11). Значення $Q_{\max} \cdot L_{\text{еф}}$ можуть бути отримані з Q_{\max} при використанні значення $L_{\text{еф}} = 0.65$ м.

Експериментальні дані дають положення максимуму на рівні 20–30 °С. Ця розбіжність показує значний вплив калюжі та розподілу теплових потоків, що підводяться до кожної канавки, на значення $Q_{\max} \cdot L_{\text{еф}}$, і тому механізми цього впливу ще повинні у подальшому вивчатися.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВИХ ТРУБ З ПОРИСТИМ ПОКРИТТЯМ КАНАВОК ТА БЕЗ НЬОГО

Можливе підвищення ефективності теплових труб досягається за рахунок зменшення термічного опору. У проекті було поставлено задачу перевірити таку можливість для профілів ТТ європейських розробників теплових труб за допомогою нанесення пористого покриття у зоні теплообміну [61]. Одним із зразків для та-

кого дослідження було запропоновано профіль АС-КРА7.5–Р2 з омегоподібними канавками виготовлення НТУУ «КПІ» (рис. 12), який вже має кваліфікацію у космічних місіях [47]. На основі цього профілю було виготовлено зразки ТТ довжиною 1 м, і два зразки були покриті усередині ТТ пористим шаром на основі порошку алюмінію товщиною 50 та 100 мкм за технологією ІТМО [63].

Теплові труби без пористого шару та з пористим шаром були протестовані на стендах НТУУ «КПІ» та на стенді ІТМО АН Білорусі, де визначалися розподіл температур по довжині корпусу при підведеній тепловій потужності до 20–250 Вт, термічний опір та коефіцієнти теплообміну в зонах теплопідводу та тепловідводу, а також максимальна теплопередавальна спроможність.

В результаті експериментального дослідження встановлено, що дані НТУУ «КПІ» та інші незалежні дослідження профілю АС КРА 7.5-Р2 дають величину $Q_{\max} L_{\text{еф}} \approx 220 \pm 10$ Вт·м для температур 20–50 °С. Нанесення пористого шару покриття зменшує термічний опір зони нагріву внаслідок інтенсифікації процесів теплообміну на 30–80 %. Величина $Q_{\max} L_{\text{еф}}$ для ТТ цього профілю зменшується на 10–15 % через зменшення пропускного перерізу каналів канавок і зміну руху теплоносія у канавках. Подальша проробка технології нанесення і застосування пористого покриття, а також пошук інших шляхів дозволять забезпечити функціонування ТТ з мінімальним можливим температурним перепадом у зоні теплопідводу та тепловідводу теплових труб з поздовжніми канавками при зростаючих значеннях теплового потоку та щільності теплового потоку.

ВИСНОВКИ

1. В період 2007–2008 рр. під час виконання міжнародного проекту, фінансованого ІНТАС та НКАУ, за участю всесвітньо відомих виробників теплових труб фірми Thales Alenia Space (Франція), Euro Heat Pipes S.A. (Бельгія) та НТУУ «КПІ» (Україна) та наукових колективів Інституту тепломасообміну (ІТМО) Академії наук Республіки Білорусь, Лабораторії теплових проблем Національного дослідного центру Франції (LET CNRS) та Лабораторії теплових труб НТУУ «КПІ» були отримані нові результати, які продовжують розвиток науково-технологічних основ створення сучасних конструкцій теплових труб з поздовжніми канавками для використання у космічній галузі. Були розглянуті питання теорії теплообміну у зонах підводу тепла канавкових ТТ, проаналізовані модельні уявлення про розрахунок максимальної теплової спроможності таких теплових труб, проведено експериментальне та теоретичне дослідження гідравлічних характеристик канавок ТТ європейських виробників теплових труб та експериментально підтверджена можливість підвищення інтенсивності теплообміну у зоні підводу тепла за рахунок нанесення пористого шару на поверхню канавок.

2. У виконанні проекту взяли участь наукові групи лабораторії теплових труб НТУУ «КПІ» під керівництвом кандидата технічних наук В. М. Батуркіна і кандидата технічних наук Б. М. Рассамакіна, викладачі кафедри АЕС та ІТФ, а також молоді вчені — магістранти НТУУ «КПІ» О. С. Горашенко, А. М. Наумова. За тематикою проекту опублікована одна наукова стаття, зроблено чотири доповіді на міжнародних наукових конференціях, опубліковано чотири тези доповідей. Матеріали, отримані учасниками проекту, обговорювалися на чотирьох робочих зустрічах співвиконавців проекту.

Виконавці проекту — вчені НТУУ «КПІ» вдячні ІНТАС, КНЕС та НКА України за можливість плідної співпраці із провідними науковцями та виробниками космічного обладнання у Європі.

1. Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Э. В. и др. SolidWorks — компьютерное моделирование в инженерной практике. — Санкт-Петербург: БХВ, 2005. — С. 170–173.
2. Андреанов В. В., Артамонов В. В., Атманов И. Т. и др. Автономные планетарные станции. — М.: Наука, 1973. — 280 с.
3. Бажан П. И., Каневец Г. Е., Селивестров В. М. Справочник по теплообменным аппаратам. — М.: Машиностроение, 1989. — 366 с.
4. Баранцевич В. Л., Опрышко С. И., Шемятовская Р. А. Разработка и испытания низкотемпературных тепловых труб с продольными пазами // Тепловые трубы: теплообмен, гидродинамика, технология: Матер. межотраслевой конф. «Теплофизические исследования-1979». — Обнинск, 1980. — Ч. 2. — С. 82–89.
5. Батуркин В. М. Опыт применения европейского стандарта PSS-49 при разработке низкотемпературных тепловых труб для пассивной системы теплового контроля микроспутника BIRD // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 1 (67). — С. 52–58.
6. Белан Н. В., Безручко К. В., Елисеев В. Б., Романкевич А. В. Применение тепловых труб в бортовых энергосистемах летательных аппаратов. — Харьков: Харьковский авиационный ин-т, 1984. — 151 с.
7. Богданов С. Н., Иванов О. П., Курянова А. В. Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Агропромиздат, 1985. — 208 с.
8. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1972. — 720 с.
9. Васильев Л. Л., Гракович Л. П., Хрусталева Д. К. Тепловые трубы в системах с возобновляемыми источниками энергии. — Минск: Наука и техника, 1988. — 159 с.
10. Дан П., Рей Д. Тепловые трубы: Пер. с англ. — М.: Энергия, 1979. — 272 с.
11. Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Ягодкин И. В. Физические основы тепловых труб. — М.: Атомиздат, 1978. — 256 с.
12. Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники. — 3-е изд., перераб., доп. / Под ред. М. П. Малкова. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 432 с.
13. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов / Под ред. Г. И. Воронина. — М.: Машиностроение, 1976. — 200 с.
14. Перельштейн И. И., Парушин Е. Б. Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ

- холодильных машин и тепловых насосов. — М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1984. — 232 с.
15. *Свердлов Г. З., Янвель Б. К.* Курсовое и дипломное проектирование холодильных установок и систем кондиционирования воздуха. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Пищевая пром-сть, 1978. — 90 с.
 16. *Семена М. Г., Гершуни А. Н., Заринов В. К.* Тепловые трубы с металло-волоконными капиллярными структурами. — Киев: Вища шк., 1984. — 215 с.
 17. *Смирнов Г. Ф., Цой А. Д.* Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах. — М.: Изд-во МЭИ, 1999. — 439 с.
 18. *Справочник по теплообменникам: В 2 т. / Под ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова; Пер. с англ.* — М.: Энергоатомиздат, 1987. — Т. 1. — С. 126—127.
 19. *Уонг Х.* Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник: Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1979. — 216 с.
 20. *Фаворский О. Н., Каданер Я. С.* Вопросы теплообмена в космосе: Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., доп. — М.: Высш. шк., 1972. — 280 с.
 21. *Хуфшиmidt В., Бурк Е., Кола Г. и др.* Влияние касательных напряжений, возникающих при движении пара, на ламинарный поток жидкости в капиллярах тепловых труб // Тепловые трубы / Под ред. Э. Э. Шпильрайна. — М.: Мир, 1972. — С. 203—243.
 22. *Чи С.* Тепловые трубы: теория и практика: Пер. с англ. В. Я. Сидорова. — М.: Машиностроение, 1981. — 207 с.
 23. *Barantsevich V., Goncharov K.* Aspects of Miniature Axial Groove Heat Pipes Development // Proc. VII Minsk International Seminar, Minsk, Belarus, September 8—11, 2008. — Minsk, 2008. — P. 110—114.
 24. *Barantsevich V., Goncharov K., Orlov A., Golovin O.* Investigation Results of Axial Grooved Heat Pipes with High Thermal Capacity // Proc. 31st International Conference on Environmental Systems, SAE, July 9—12, 2001, Orlando, USA. — Orlando, 2001. — 7 p. — (Report 2001-01-2236).
 25. *Barantsevich V. L., Opryshko S. I.* Studies of Heat Pipes with Combined Capillary Structure. // Preprint of International Conference on Heat Transfer in Energy Conservation, October 6—9, 1988, Shenyang, China. — Shenyang, 1988. — P. 247—250.
 26. *Barantsevich V. L., Ovchinnikov B. N.* The Heat Transfer Characteristics Improvement of the Axial Groove Heat Pipes // Preprint of 8th International Heat Pipes Conference, September 14—18, 1992, Beijing, China. — Beijing, 1992. — P. 17-1—17-5.
 27. *Barantsevich V. L., Veretennikov B. N., Opryshko S. I., et al.* Sintering of Silicon Doped Aluminum Fibers // Powder Metallurgy. — 1981. — N 221. — P. 27—29.
 28. *Baturkin V., Bondar L., Shcoda K.* Thermal Regimes Simulation of Ramified Heat Pipes Communication by Finite Element Method // Proc. 25th International Conference on Environmental Systems, July 10—13, 1995, San-Diego, California, USA. — San-Diego, 1995. — 5 p. — (SAE Technical Series N 951553).
 29. *Baturkin V., Olefirenko D.* Research on Axially Grooved Heat Pipe Heat Transfer Characteristics in Ground Tests // Proc. 31st International Conference on Environmental Systems, SAE, July 9—12, 2001, Orlando, USA. — Orlando, 2001. — 5 p. — (Report 2001-01-2237).
 30. *Baturkin V., Zhuk S., Olefirenko D., et al.* Thermal qualification tests of longitudinal ammonia heat pipes for using in thermal control systems of small satellites // Proc. IV Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators». September 4—7, 2000, Heat and Mass Transfer Institute, Minsk, Belarus. — Minsk, 2000. — P. 261—269.
 31. *Bertossi R., Bertin Y., Ayel V., et al.* Modelling of the Transfer in Micro-Region in Axially Grooved Heat Pipes // Proc. VII Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators», September 8—11, 2008, Heat and Mass Transfer Institute, Minsk, Belarus. — Minsk, 2008. — P. 44—51.
 32. *Borodkin A. A., Pustyakov Y. I., Portnov V. D., et al.* Mathematical Simulation of Liquid Condensation Process in Heat Pipes with Axial Grooves // Proc. 7th the International Heat Pipe Conference, May 21—25, 1990, Minsk. — Minsk, 1990. — 7 p.
 33. *Brandt C., Stephan P., Dubois M., et al.* Theoretical Investigation of Advanced Capillary Structures in Grooved Heat Pipe Evaporators for Space Applications // Proceedings of 30th International Conference on Environmental Systems. July 10—13, 2000, Toulouse, France. — Toulouse, 2000. — 7 p. — (SAE report 2000-01-2319).
 34. *Brennan P., Kroliczek E.* Heat Pipe Design Handbook. B&K Engineering, Inc, USA, Contract NAS5-23406, 1979. — 370 p.
 35. *Dubois M., Van Oost S., Bekaert G., et al.* High Capacity Grooved Heat Pipes. // Proceedings of the 4th European Symposium on Space Environmental Control Systems, 1991, Florence, Italy. — Florence, 1991. — P. 575—581.
 36. *Dubois M., Van Oost S., Mullender B.* High Capacity Grooved Heat Pipe. // Proceedings of the 23^d International Conference on Environmental Systems. SAE, July 12—15, 1993, Colorado Springs, USA. — Colorado Springs, 1993. — 6 p. — (SAE Technical Series 932303).
 37. *Dvirniy V. V., Testoedov N. A.* Development, Tryout and Manufacture of the Heat Pipes for the Communication,

- Navigation and Geodesic Satellites // Proc. VII Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators», September 8–11, 2008, Heat and Mass Transfer Institute, Minsk, Belarus. — Minsk, 2008. — P. 94–103.
38. *ESATAN User Manual*. ALSTOM Power Technology Centre, Whetstone, Leicester, UK, UM-ESATAN-004, ESATAN 8.9, April 2003. — P. 4-13 — 4-33.
 39. *Furukawa M.* Practical Expressions for Thermodynamic and Transport Properties of Commonly Used Fluids // *J. Thermophys. and Heat Transfer*. — 1991. — **5**, N 4. — P. 524–531.
 40. *High Performance Grooved Heat Pipes*. Final Report HGP-RP-SA-022-92, S.A.B.C.A, Belgue, 1992. — 56 p.
 41. *Hoа C., Demolder B., Alexandre A.* Roadmap for Developing Heat Pipes for ALCATEL Space's Satellites // Proc. 12th International Heat Pipe Conference, May 19–24, 2002, Moscow, Russia. — Moscow, 2002. — Report C1. — P. 235–240.
 42. *Kobayashi Y., Ikeda S., Iwasa M.* Evaporative Heat Transfer at the Evaporative Section of a Grooved Heat Pipe // *J. Thermophys. and Heat Transfer*. — 1996. — **10**, N 1. — P. 83–89.
 43. *Ma H. B., Peterson G. P.* Temperature Variation and Heat Transfer in Triangular Grooves with an Evaporating Film // *J. Thermophys. and Heat Transfer*. — 1997. — **11**, N 1. — P. 90–97.
 44. *Nguyen T. M., Brennan P. J.* Development and Applications of the Groove Analysis Program (GAP) // Proc. 25th International Conference on Environmental Systems, SAE, July 10–13, 1995, San Diego, California, USA. — San Diego, 1995. — 12 p. — (SAE Technical Series 951554).
 45. *Pietsch C., Hauser J.* Development and testing of a high performance quadro-groove heat pipe // Proc. 21th International Conference on Environmental Systems, SAE, July 15–18, 1991, San Francisco, California. — San Francisco, 1991. — 6 p. — (SAE Paper Number Series 911481).
 46. *Potash M., Wayner P. C. Jr.* Evaporation from a Two-Dimensional Extended Meniscus // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. — 1972. — **25**. — P. 1851–1863.
 47. *Rassamakin B. M., Kharnasov S. M., Zaripov V. K., et al.* Aluminium Profiled Heat Pipes and Honeycomb Panels; Experiments and Simulation // Preprint of the 14th International Heat Pipes Conference, Section 12, April 22–27, 2007, Florianopolis, Brazil. — Florianopolis, 2007. — 7 p. — (CEP 88058-700).
 48. *Richter R. F. G., Brennan P. J., Rankin J. G.* Development of an Advanced Trapezoidal Axially Grooved (ATAG) Heat Pipe // Proc. 4th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. AIAA, 1986, paper N 86-1342. — 7 p.
 49. *Schlitt R.* Influence of Ammonia Fill Rates on the Performance of Axially Grooved Heat Pipes. ERNO Raumfahrttechnik GmbH, Germany, 1981. — 152 p. — (Technical report ANTD3 N 148/81).
 50. *Schlitt R.* Performance Characteristics of Recently Developed High Performance Heat Pipe. // Proc. 8th International Heat Pipe Conference, September 14–18, 1992, Beijing, China. — Beijing, 1992. — P. 1–8.
 51. *Schlitt R.* Performance Characteristics of High-Performance Heat Pipes // *Heat Transfer Engineering*. — 1995. — **16**, N 1. — P. 44–52.
 52. *Shekrihadze I. G.* Evaporation and Condensation on Capillary Surfaces, Achievements and Unsolved Problems // Proc. 10th International Heat Pipe Conference, September 21–25, 1997, Stuttgart, Germany. — Stuttgart, 1997. — 6 p.
 53. *Smirnov H. F., Goncharov K. A., Kochetkov A. Yu., et al.* Two-Phase Thermal Control Systems Investigations in Odessa State Academy of Refrigeration (OSAR) commonly with Lavochkin Association before 2000 and outside OSAR in the Next Years. // Proceedings of the VII Minsk International Seminar, Minsk, Belarus, September 8–11, 2008. — Minsk, 2008. — P. 161–177.
 54. *Smirnov-Vasiljev K. G., Dvirny V. V.* An Experimental Investigation on Long Aluminium Grooved Heat Pipe for HoneyComb Sandwich Plates Satellites and its Application in the Absorbition Fridge // Proc. 9th International Heat Pipe Conference, May 1–5, 1995, Albuquerque, USA. — Albuquerque, 1995. — Vol. 2. — P. 717–722. — (LA-UR-97-1500).
 55. *Spacecraft Thermal Control Design Data*. ESA Procedures Standards and Specifications PSS-03-108: In 9 vol. — European Space Agency, 1989. — Vol. 5. — 121 p.
 56. *Spacecraft Thermal Control Handbook: 2 ed.* — The Aerospace Press, El Segundo, California; American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, Virginia, 2002. — Vol. 1. — P. 489–522.
 57. *Stephan P.* Microscale Heat and Mass Transfer Phenomena and their Influence on Macroscopic Evaporator Performance // Proc. 9th International Heat Pipe Conference, May 1–5, 1995, Albuquerque, USA. — Albuquerque, 1995. — Vol. 1. — P. 8–17. — (LA-UR-97-1500).
 58. *Stephan P. C., Busse C. A.* Analysis of the Heat Transfer Coefficient of Grooved Heat Pipe Evaporator Walls // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. — 1992. — **30**, N 2. — P. 383–391.
 59. *Tarasov G. V., Rassamakin B. M.* Creation and Application in Design of Space Satellites High-Effective

- Aluminium Heat Pipes // Proc. 4th Ukraine-Russia-China Symposium of Space Science and Technology. September 12–17, 1996, NKAU, Kyiv, Ukraine. — Kyiv, 1996. — P. 213–215.
60. *TAS* — Thermal Analysis System. User's manual. Harvard Thermal Inc., USA. Document HTTAS, 2003. — 413 p.
61. *Vasiliev L. L., Khrustalev D. K., Kulakov A. G.* High-Efficient Condenser with Porous Element // Proc. 21st Conference on Environmental Systems, July 15–18, 1991, San Francisco, California. — San Francisco, 1991, — 6 p. — (SAE Technical Paper Series N 911524).
62. *Vasiliev L., Lapotko D., Lukianova E., et al.* Two-Phase Heat Transfer Enhancement in Micro Channels and Heat Pipe Evaporators with Nano Porous Structures // Preprint of the 14th International Heat Pipes Conference, Section 5, April 22–27, 2007, Florianopolis, Brazil. — Florianopolis, 2007. — 6 p. — (CEP 88058-700).
63. *Vasiliev L., Zhuravlyov A., Shapovalov A., et al.* Vaporization Heat Transfer in Porous Wicks of Evaporators // *Archi. Thermodynamics*. — 2004. — **25**, N 3. — P. 47–59.
64. *Xu X., Carey V. P.* Film Evaporation from a Micro-Grooved Surface — An Approximate Heat Transfer Model and Its Comparison with Experimental Data // *J. Thermophys. and Heat Transfer*. — 1990. — **4**, N 4. — P. 512–520.

Надійшла до редакції 20.02.09

V. M. Baturkin

ELABORATION OF SCIENTIFIC-TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS FOR UP-TO-DATE HEAT PIPE DESIGN FOR SPACE APPLICATION ON THE BASIS OF THE MATERIALS OF THE INTAS-CNES-NSAU PROJECT

We give a survey of basic results of the international project No 06-1000024-8916 in the framework of collaboration between the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), the International Association for promotion of cooperation with scientists from the New Independent States of the former Soviet Union (INTAS) and the National Space Agency of Ukraine (NSAU) in the field of space thermal control technology. In the project, the emphasis is on the detailed study of modern heat pipes with axial grooves.

УДК 529.786+621.317.76.089.68

Ю. П. Мачехін¹, В. М. Романько², А. О. Шелехов², А. М. Негрійко³, Л. П. Яценко³

¹Харківський національний університет радіоелектроніки

²Національний науковий центр «Інститут метрології», Харків

³Інститут фізики Національної академії наук України, Київ

РУБІДІЄВІ СТАНДАРТИ ЧАСТОТИ: ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ І ВДОСКОНАЛЕННЯ

Розглянуто деякі питання розвитку рубідієвих стандартів частоти шляхом формування частотних реперів з використанням лазерних випромінювачів. Наведено результати досліджень частотних дискримінаторів та напівпровідникових лазерів.

До останнього часу рубідієві стандарти частоти (РСЧ) є найбільш вживаними джерелами еталонних частот, оскільки вони забезпечують досить високу точність часових та частотних вимірювань у складних інформаційних системах. У першу чергу до таких систем відносяться системи енерго- й газопостачання [2], GPS-технології [3], керування транспортними системами [4] і радіонавігація [1]. У GPS та інших космічних технологіях (наприклад, проект «Галілео») стандарти частоти одночасно використовуються на космічних об'єктах і наземних контрольно-вимірювальних базових станціях та повинні мати дуже близькі метрологічні характеристики. Крім того, їхнє надійне й ефективне застосування має бути забезпечене системою оперативного зв'язування сигналів стандартів частоти, розташованих на космічних об'єктах, із сигналами стандартів на Землі.

Специфіка сучасних РСЧ з рекордно високими метрологічними характеристиками полягає в тому, що їхнє конструктивне й технічне виконання залишається поки що на рівні приладів лабораторного застосування. Безумовно, спираючись на типові РСЧ, випущені малими серіями, як на основні базові засоби вимірювань, необхідно створювати такі стандарти частоти, гранично високий технічний і метрологічний

рівень яких зберігався би і в умовах, відмінних від лабораторних.

Аналіз структури сучасних РСЧ приводить до загального висновку, що одним із найбільш складних і ненадійних елементів РСЧ є частотний дискримінатор, у якому, з одного боку, використовується оптичне випромінювання, а з іншого — стабілізація здійснюється в радіочастотному діапазоні. Стабільність і відтворюваність частоти генерації стандарту визначається великою кількістю параметрів, серед яких домінують стабільність потужності й спектру випромінювання ламп накачування рубідієвої комірки. Без кардинального розв'язку завдання стійкого й стабільного режиму оптичного накачування подальший розвиток РСЧ навряд чи буде ефективним. У зв'язку з наведеними аргументами були проведені дослідження, метою яких було вивчення умов використання напівпровідникового лазера як джерела оптичного випромінювання, що забезпечує накачування рубідієвої комірки дискримінатора.

ЗАГАЛЬНІ УМОВИ РОБОТИ РУБІДІЄВИХ СТАНДАРТІВ ЧАСТОТИ

Принцип дії РСЧ базується на стабілізації частоти вихідного сигналу кварцевого генератора за лінією поглинання атомів рубідію при переході з одного енергетичного стану до іншого між підрівнями надтонкої структури основного стану атомів ⁸⁷Rb.

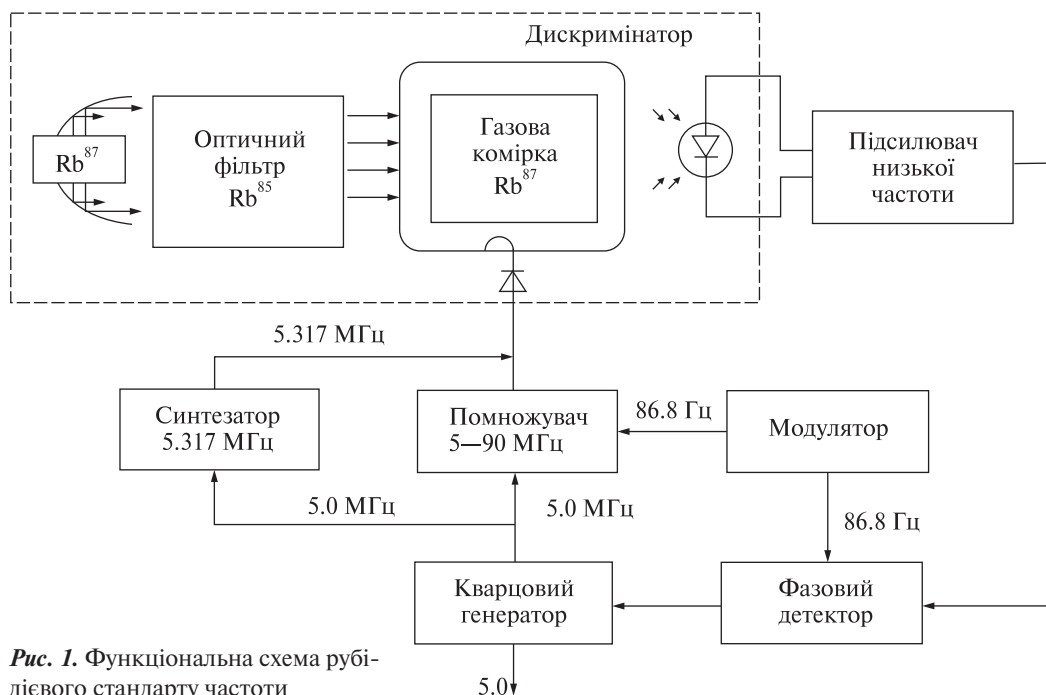


Рис. 1. Функціональна схема рубідієвого стандарту частоти

Спрощену функціональну схему рубідієвого стандарту частоти класичного типу наведено на рис. 1.

Висока стабільність частоти вихідного сигналу забезпечується стабільністю частоти еталонного атомного переходу та малою шириною його спектральної лінії поглинання.

Основним вузлом рубідієвого стандарту, у якому реалізується його принцип дії, є квантовий дискримінаатор. У об'ємному резонаторі, налаштованому на частоту мікрохвильового переходу, розташована скляна комірка з парою ^{87}Rb . Як джерело накачування, як правило, застосовується газорозрядна лампа з парою того ж елемента. Світло від цієї газорозрядної лампи після оптичної фільтрації, яка здійснюється за допомогою комірки з парою, наповненою іншим ізотопом рубідію ^{85}Rb , накачує атоми у комірку поглинання і далі попадає на фотодіод. Одночасно комірка поглинання зазнає впливу НВЧ-поля резонатора, на вхід якого надходить сигнал помноженої частоти кварцевого генератора. Необхідна для збудження атома рубідію резонансна частота 6834.692540 МГц формується шляхом прямого помноження сигналу кварцевого гене-

ратора та підмішування до нього сигналу синтезатора, в результаті чого одержується НВЧ-сигнал частотою, який використовується для збудження переходів у атомах ^{87}Rb . НВЧ-сигнал модулюється за частотою. Низькочастотна фазова модуляція здійснюється у одному з каскадів помножувача. Поглинання світла атомами ^{87}Rb у комірці буде змінюватись відповідно до модуляції, а на виході фотодіода з'являється сигнал, що несе інформацію про величину і знак відхилення помноженої частоти кварцевого генератора від центра лінії еталонного атомного переходу.

Таким чином, рубідієвий стандарт частоти з оптичним накачуванням — це типова система частотного автопідстроювання (ЧАП), у дискримінааторі якого використовується 0-0-перехід між підрівнями надтонкої структури основного стану атомів ^{87}Rb .

НАКАЧКА РУБІДІЄВИХ СТАНДАРТІВ ЧАСТОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ЛАЗЕРНИМ ДІОДОМ

Одним з найважливіших елементів дискримінаатора є джерело накачки парів рубідію, яким, як

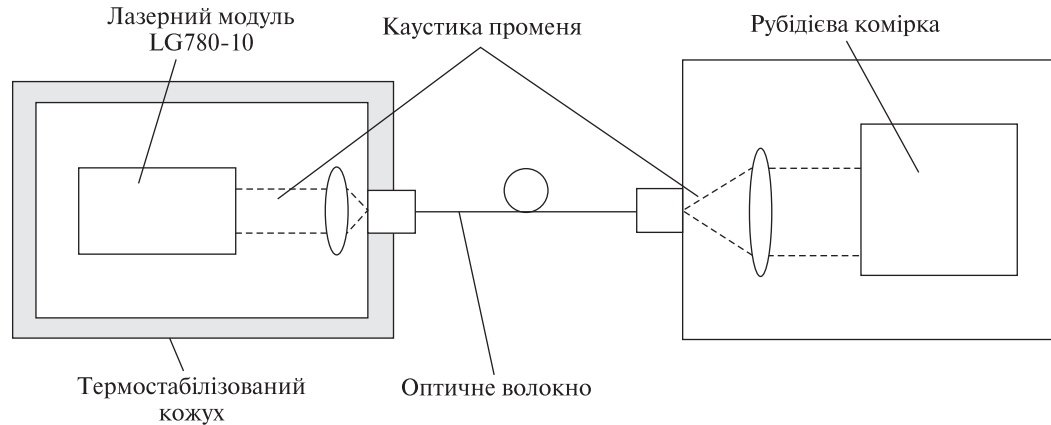


Рис. 2. Функціональна схема з'єднання лазерного модуля LG780-10 і рубідієвої комірки

правило, є газорозрядна лампа з парою ^{87}Rb . Цей елемент є одним з найскладніших для виготовлення як з технологічного, так і з конструкційного боку.

Збудження лампи накачки на парі рубідію здійснюється за допомогою спеціальної електронної схеми. Спочатку генератором пілкоподібних імпульсів збуджується інертний газ. Після цього генератор відключається, і залишається збудження розрядом НВЧ-поля від НВЧ-джерела. При певних значеннях струму підігріву та потужності НВЧ-збудження лампа починає випромінювати світло необхідної довжини хвилі для збудження 0-0-переходу у комірці поглинання.

Очевидно, що газорозрядна лампа має занадто складну оптико-механічну конструкцію, для її виготовлення необхідне складне технологічне обладнання. Вона дуже критична до струму підігріву та потужності НВЧ-збудження. Крім того, її типова вартість перевищує 1500 \$ США.

В даній роботі для спрощення конструкції дискримінатора ми пропонуємо як джерело накачки напівпровідниковий лазерний модуль LG780-10 виробництва фірми LG, стабілізований за довжиною хвилі і має достатню потужність випромінювання. Цей модуль призначено для застосування у апаратурі, де висуваються підвищені вимоги до стабільності випромінюваного сигналу, якості променя, відмовостійкості тощо.

Лазерний модуль LG780-10 має такі характеристики:

- довжина хвилі випромінювання — 780 нм;
- максимальна вихідна потужність (з колімаційною оптикою) — 5 мВт;
- робоча температура навколишнього середовища — до 45 °С.

Лазерний модуль LG780-10 оснащено високоякісною колімаційною оптикою, яка дозволяє подальше формування променя з необхідними параметрами (каустика та ін.).

У випадку застосування лазера для накачки РСЧ критичною характеристикою є довжина хвилі лазерного випромінювання. На довжину хвилі впливають різні параметри, у тому числі температура навколишнього середовища. Ця температура у блоці, де працює рубідієва комірка, становить +55...+65 °С. Це недопустимо для нормальної роботи лазерного модуля LG780-10, тому пропонується розташувати модуль у окремому термостабілізованому кожусі. За таких умов випромінювання буде надходити до блоку рубідієвої комірки по оптичному волокну. Далі промінь буде розширюватись за допомогою колімуючої оптики до потрібних параметрів і подаватись на рубідієву комірку. Функціональну схему такого з'єднання наведено на рис. 2.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РУБІДІЄВОГО ДИСКРИМІНАТОРА З ЛАЗЕРНИМ НАКАЧУВАННЯМ

У ході роботи було відпрацьовано конструкцію макетного зразка квантового дискримінатора

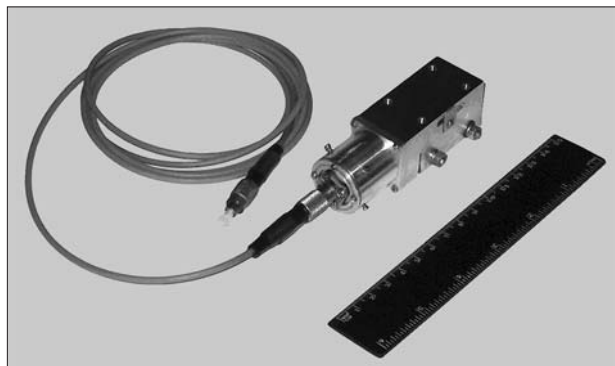


Рис. 3. Лазерний модуль з волоконним виводом випромінювання

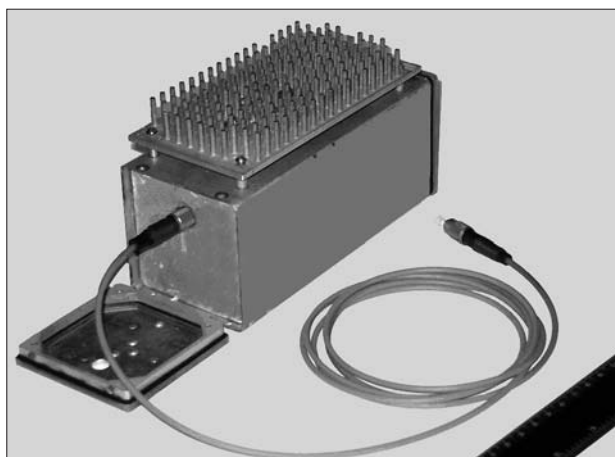


Рис. 4. Квантовий дискримінатор з волоконним введенням випромінювання

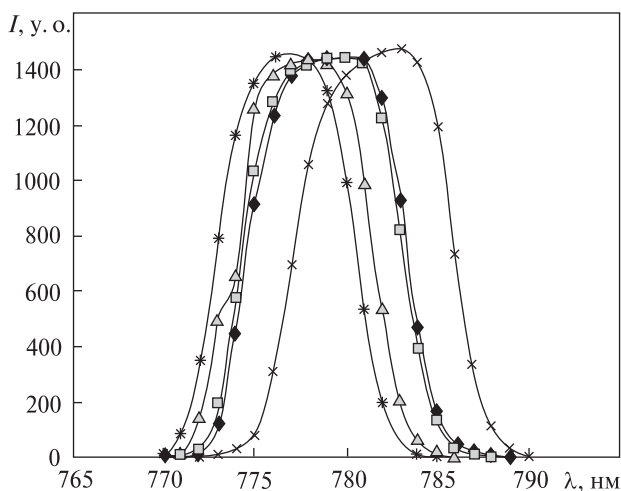


Рис. 5. Спектр лазера при різних температурах (♦ і □ — 23 °С, △ — 18.5 °С, × — 15.5 °С, * — 38 °С)

(рис. 3, 4). За його основу взято конструкцію квантового дискримінатора стандарту СЧВР-1, але замість спектрального джерела застосовується вузол джерела накачування (ВДН). Він дозволяє передати до комірки поглинання для її збудження світловий сигнал, що подається по спеціальному світловоду від вузла формування світлового сигналу (ВФСС) лазерного діода LG780-10. Решта вузлів дискримінатора залишилися без змін.

Резонансними довжинами хвиль для рубідію є довжини хвиль 780 нм і 785 нм, причому довжина хвилі визначається з точністю до сотих одиниць нанометра. Потужність випромінювання накачування має менш критичне значення. Отже, першочерговим завданням є здатність точного підстроювання довжини хвилі випромінювання напівпровідникового лазера накачування з подальшим утриманням заданої величини.

Відомо, що довжина хвилі випромінювання напівпровідникового лазера залежить від струму, який протікає через кристал напівпровідника, а також від температури напівпровідникового лазерного діода. Оскільки величина струму, який протікає через напівпровідниковий лазер, більшою мірою впливає на потужність випромінювання, а також обмежена граничним значенням, при якому відбувається необоротне руйнування напівпровідникового лазерного діода, струм прийнято встановлювати відповідно до номінального значення для кожного конкретного екземпляра напівпровідникового лазерного діода. При номінальному значенні струму напівпровідникового лазера довжина хвилі випромінювання також близька до номінальної. Таким чином, для підстроювання довжини хвилі випромінювання напівпровідникового лазера необхідно мати технічну можливість змінювати у певних межах температуру напівпровідникового лазерного діода і утримувати потрібне її значення з точністю, яку вимагає експериментальне дослідження.

Було проведено експериментальне дослідження залежності впливу температури лазерного модуля LG780-10 на його довжину хвилі випромінювання. Перед кожним вимірюванням лазер витримувався в робочому режимі не мен-

ше двох годин, щоб міг встановитися термодинамічний баланс між лазерним модулем і охолоджувачем на базі елемента Пельтьє. Результат представлено на рис. 5.

Як видно з одержаних залежностей, для вирішення поставленої задачі необхідні контролери струму і температури для напівпровідникового лазерного діода з можливістю точного підстроювання струму живлення і температури напівпровідникового лазера. Оптимальним підходом для забезпечення необхідних режимів роботи діода є застосування струмових і температурних контролерів, сконструйованих за алгоритмом повного пропорційно-інтегрально-диференційного контролю (ПІД-контролер).

Підтвердження можливості застосування напівпровідникового лазера як джерела накачування парів рубідію у стандартах частоти і часу, визначення позитивних та негативних сторін такого методу було здійснено шляхом проведення експериментальної перевірки роботи напівпровідникового лазера у складі реального приладу.

Для проведення експериментальних досліджень було зібрано макетний зразок квантового дискримінатора, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 4. Спочатку в дискримінаторі розміщувався «класичний» генератор накачування газорозрядного типу. Дискримінатор через перехідний кабель підключався до стандарту частоти СЧВ-74. Після виходу СЧВ-74 на режим і отримання на виході перепідсилювача дискримінатора другої гармоніки частотою 173.6 Гц величиною 20–40 мВ генератор накачування було замінено на лазерний модуль LG780-10. Також було отримано сигнал другої гармоніки частотою 173.6 Гц величиною 20–30 мВ зі зміною струму накачки в межах 40–50 мА. Таким чином, експериментально підтверджена принципова можливість збудження комірки поглинання випромінюванням лазерного модуля.

ВИСНОВКИ

Дослідження створеного дослідного зразка підтвердили правильність закладених принципів та технічних рішень, а одержані результати можуть служити основою подальшого удосконалення приладів, зокрема, їхнього переведення на сучасну елементну базу з метою виробництва для широкого кола споживачів.

Автори Ю. П. Мачехін, А. М. Негрійко і Л. П. Яценко вдячні фонду INTAS за часткову підтримку роботи, що виконувалася у рамках проекту 06-1000024-9075.

1. *Аргунов А. Д.* Формирование и применение интегрального радионавигационного поля // «Навигация 98»: Сб. тр. Второй междунар. конф. — 1997. — Т. 2. — С. 336–353.
2. *Клейман А. С.* Стандарт частоты и времени рубидиевый: создание, исследование и применение // Укр. метрологічний журн. — 1998. — Вип. 1–4.
3. *Клейман А. С., Левенберг А. И., Соловьев А. В. и др.* Применение рубидиевого стандарта частоты и времени в системе координатно-временного обеспечения при использовании GPS-технологий // Космічна наука і технологія. — 2001. — 7, № 4. — С. 101–106.
4. *Сетевые спутниковые радионавигационные системы /* Под ред. В. С. Шебшаевича. — М.: Радио и связь, 1993. — 408 с.

Надійшла до редакції 20.02.09

*Yu. P. Machekhin, V. M. Roman'ko,
A. O. Shelekhov, A. M. Negriyko, L. P. Yatsenko*

RUBIDIUM FREQUENCY STANDARDS: PROSPECTS OF DEVELOPMENT AND ADVANCE

Some aspects of the development of rubidium frequency standards with the application of laser sources for frequency discriminators formation are considered. Our results of the investigations of frequency discriminators and semiconductor lasers are given.

УДК 528.8

Л. Бродский¹, Е. И. Бушуев², В. И. Волошин², А. А. Козлова³, О. И. Паршина², М. А. Попов³,
В. И. Саблина², А. И. Сахацкий³, А. В. Сиротенко⁴, Т. Соукуп¹, С. А. Станкевич³, А. Г. Тарарико⁴

¹ Gisat s.r.o. — Geoinformation Company, Praha, Czech Republic

² Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

³ Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі НАН України, Київ

⁴ Інститут агроєкології Української академії аграрних наук, Київ

ПРОЕКТ INTAS ПО РАЗРАБОТКЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ КЛАССИФИКАЦИИ ЗЕМНЫХ ПОКРЫТИЙ: НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ, ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Викладено основні результати проекту INTAS зі створення автоматизованої технології класифікації земних покривів. Проект виконувався у 2007–2008 рр. за підтримки Національного космічного агентства України та Космічного агентства Франції. Розроблена технологія базується на використанні матеріалів багатоспектральної космічної зйомки земної поверхні з детальністю 15–30 м. Кінцевим інформаційним продуктом розробленої технології є тематичні карти території з номенклатурою об'єктів, гармонізованою з європейською системою класифікації земних покривів CORINE Land Cover Classification System.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших условий поддержания стабильности развития и предупреждения чрезвычайных ситуаций, оценки последствий природных и техногенных катастроф является наличие оперативной и достоверной информации о состоянии окружающей среды и протекающих в ней процессах. Другое условие состоит в том, что уровень полноты получаемых геоданных должен позволять оценивать все сколь-нибудь существенные изменения, обусловленные как деятельностью человека, так и динамикой геосистем, а также осуществлять прогнозирование процессов.

Выполнение указанных условий невозможно без наличия средств аэрокосмического мониторинга и развитой инфраструктуры передачи, обработки и анализа геоданных. При этом должен быть отработан максимально простой и прозрачный механизм обмена информацией, для че-

го данные должны быть представлены в форме, доступной всем пользователям.

Начало работам по созданию единой европейской системы сбора и обмена информацией о состоянии природной среды континента было положено Программой CORINE (Coordination of information on the environment), инициированной Еврокомиссией (European Commission) в 1985 г. [12]. Эта программа позволила объединить усилия ученых и специалистов западноевропейских стран по сбору, унификации и координации геопространственной и тематической информации о состоянии суши, растительности и водных ресурсов, распределении природных ресурсов, уровне урбанизации и др., разработке новых подходов к получению и обработке данных с целью повышения эффективности управленческих решений.

В программе CORINE нашли самое широкое применение методы аэрокосмического мониторинга Земли. На основе материалов космических съемок со спутников «Landsat» и SPOT к началу 1990-х гг. были составлены цифровые карты земных покрывий для нескольких стран

© Л. БРОДСКИЙ, Е. И. БУШУЕВ, В. И. ВОЛОШИН,
А. А. КОЗЛОВА, О. И. ПАРШИНА, М. А. ПОПОВ,
В. И. САБЛИНА, А. И. САХАЦКИЙ, А. В. СИРОТЕНКО,
Т. СОУКУП, С. А. СТАНКЕВИЧ, А. Г. ТАРАРИКО, 2009

западной Европы в масштабе 1:100 000. Важным результатом программы CORINE явилось создание единой номенклатуры земных покрытий на территорию Европы (CORINE Land Cover Classification System). Это многоуровневая классификационная схема, с разбиением объектов на 5 классов на 1-м уровне, на 15 классов — на 2-м уровне и на 44 класса — на 3-м уровне. Номенклатура классов земных покрытий в совместно разработанной европейскими странами системе CORINE LCC по уровням представлена в первых трех столбцах табл. 1. Следует подчеркнуть, что классификационная схема CORINE LCC допускает, при необходимости, дальнейшую детализацию в виде наращивания дополнительных уровней [12]. Эта возможность использована в выполненном авторами проекте INTAS.

Собранная к началу 1990-х годов информация о земных покрытиях, систематизированная в соответствии с номенклатурой CORINE Land Cover Classification System и дополненная данными наземных наблюдений и измерений, составила содержание базы данных CLC1990. В последующие годы к проекту CORINE постепенно присоединялись и другие страны (к 2000 г. их число в проекте достигло 29), и соответственно пополнялся каталог базы данных CLC1990.

В период с 2000 по 2005 гг. по инициативе и поддержке European Environment Agency (EEA) был выполнен большой объем работ по повышению качества (коррекции) содержимого базы данных CLC1990 и его обновлению на основе орторектифицированных материалов актуальных космических съемок с КА «Landsat-7», сформулированы общие технические требования к результатам классификации объектов на космических изображениях.

Съемки обеспечили практически полное (без пропусков) покрытие снимками всей территории европейского континента, после чего было проведено их интерактивное (computer-assisted) дешифрирование. Это позволило не только сформировать уточненную и детализованную карту земных покрытий, но и сделало возможным решение такой актуальной и важной задачи, как

выявление и оценивание темпоральных изменений природной среды в Европе. Обновленная база данных получила наименование CLC2000, в ее составлении приняло участие 32 страны. База данных CLC2000 доступна через портал European Environment Agency <http://dataservice.eea.europa.eu>.

Соответствие качества материалов базы CLC2000 и конечных информационных продуктов CORINE требованиям пользователей (муниципальных и региональных органов власти, землепользователей, экологов и т. д.) было проанализировано в проекте European Land Use/Cover Area Frame Statistical Survey — LUCAS [22]. Исследование проводилось European Topic Centre on Terrestrial Environment (ETC/TE) при участии геоинформационной компании Gisat s.r.o. (Прага, Чешская республика). Анализ, проведенный в проекте LUCAS, показал, что база CLC2000 и продукты на ее основе в основном удовлетворяют запросам пользователей. Однако было отмечено следующее.

1. Точность классификации некоторых категорий объектов уступает заявленной в CORINE величине общей точности 85 % (табл. 2), причем процент ошибок увеличивается на более высоких уровнях. Большинство специалистов-практиков землепользования не устраивает заявленные величины минимальной картируемой площади (minimum mapping unit — MMU) 25 га и ошибки координатной привязки 100 м.

2. На решениях, принимаемых при классификации объектов на космических изображениях, сильно сказывается субъективный фактор. Устойчивость и воспроизводимость результатов обработки и анализа изображений, получаемых разными операторами-дешифрировщиками, часто выходит за пределы допустимых статистических границ.

3. Дальнейшие работы по наполнению и совершенствованию данных CORINE CLC2000 целесообразно производить с использованием сервисов, создаваемых в рамках Программы Global Monitoring for Environment and Security (GMES/Kopernikus) — европейской составляющей глобального проекта Global Earth Observation System of Systems (GEOSS).

Таблица 1. Классы земных покрытий в соответствии с CORINE CLC- и TLCC-номенклатурами

Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4	
Искусственные поверхности	1.1 Городская застройка	1.1.1 Непрерывная городская застройка	1.1.1.1 Многоэтажная застройка	
			1.1.1.2 Малоэтажная застройка	
		1.1.2 Прерывная городская застройка	1.1.2.1 Многоэтажная застройка	
				1.1.2.2 Малоэтажная застройка
				1.1.2.3 Частный сектор
	1.2 Индустриальный, коммерческий и транспортный модули	1.2.1 Индустриальные и коммерческие модули	1.2.2 Дороги и связанная с ними земля	
		1.2.3 Области порта		
		1.2.4 Аэропорты		
	1.3 Свалки и участки строительства	1.3.1 Минеральные участки извлечения (полезные ископаемые)		
		1.3.2 Участки свалки		
	1.3.3 Участки строительства			
1.4 Искусственные не-сельскохозяйственные области	1.4.1 Зеленые городские области (парки)	1.4.2 Спорт и области отдыха (досуга)		
Сельскохозяйственные области	2.1 Пахотная земля	2.1.1 Неорошаемая пахотная земля		
		2.1.2 Постоянно орошаемая земля		
		2.1.3 Поля риса		
	2.2 Многолетние культуры	2.2.1 Виноградники	2.2.2 Сады и плантации ягоды	
			2.2.3 Оливковые рощи	
		2.3 Пастбища	2.3.1 Пастбища	
	2.4 Гетерогенные сельскохозяйственные области	2.4.1 Однолетние культуры с вкраплением многолетних	2.4.2 Сложные образцы культивирования	
			2.4.3 Земля, преимущественно занятая сельским хозяйством, с существенными областями естественной растительности	
			2.4.4 Области агролесничества	2.4.4.1 Лесозащитные полосы
Лес и полуприродные области	3.1 Леса	3.1.1 Лиственный лес		
		3.1.2 Хвойный лес		
		3.1.3 Смешанный лес		
	3.2 Кустарники и/или травяные ассоциации	3.2.1 Естественное поле — луг, сенокос	3.2.2 Пустоши, охотничьи угодья	
			3.2.3 Редкая растительность	
			3.2.4 Лесисто-кустарниковая местность	
		3.3 Открытые площади с незначительной растительностью	3.3.1 Берега, дюны, пески	3.3.2 Пустые без растительности камни
			3.3.3 Редко поросшие области	
		3.3.4 Сожженные области		
		3.3.5 Ледники и вечные снега		

Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4
Заболоченные земли	4.1 Внутренние заболоченные земли	4.1.1 Внутренние болота	
		4.1.2 Трясины торфа	
	4.2 Морские заболоченные земли	4.2.1 Соляные болота	
4.2.2 Солончаки			
4.2.3 Заливные области			
Водные объекты	5.1 Внутренние воды	5.1.1 Водные течения (проточная вода) — реки	
		5.1.2 Водные тела — водоемы	
	5.2 Морские воды	5.2.1 Прибрежные лагуны	
		5.2.2 Устья	
		5.2.3 Море и океан	

Выводы проекта LUCAS, а также некоторых других исследований, в частности [11, 12], были использованы при формировании цели и задач проекта, описываемого ниже.

ЦЕЛЬ ПРОЕКТА И НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

Анализ существующих ограничений системы CORINE и возможных путей их преодоления показал, что необходимо повысить требования к исходной иконической информации (в частности, требуются космические снимки более высокого пространственного и спектрального разрешения) и более глубоко автоматизировать процессы обработки данных (создать технологию автоматизированной классификации).

Автоматизация классификации изображений предусматривает создание набора дешифровочных признаков для определения объектов класса, а также создание правил обработки и валидации данных, которые обеспечили бы устойчивость классификации и гарантировали бы качество конечного информационного продукта. Модель классификации должна иметь многоуровневую структуру классов земных покрытий для обеспечения требований пользователей различных уровней — европейского, национального, регионального, местного (локального).

Основной целью представляемого в статье проекта The Model and Automated Technology for Land Cover Classification (TLCC) является научное обоснование новых моделей обработки данных и создание автоматизированной техно-

Таблица 2. Требования в CORINE CLC- и TLCC-номенклатурах

Параметр	CORINE CLC-номенклатура	TLCC-номенклатура базовых классов
Ошибка координатной привязки к карте	100 м	70 м
Минимальная картируемая площадь	25 га для всех категорий	1 га для водных объектов, 5 га для других объектов
Минимальная ширина картируемых протяженных объектов	100 м	30 м
Общая точность классификации	>85 %	≥90 %

гии классификации земных покрытий [8, 9]. Разработанная технология базируется на использовании материалов многоспектральной космической съемки земной поверхности с детальностью 15–30 м. Конечный информационный продукт технологии — тематические карты территорий с номенклатурой объектов, принятой в системе классификации CORINE LCC.

Исследования и разработки проводились в период 2007–2008 гг. в рамках гранта INTAS по космическим технологиям при поддержке Национального космического агентства Украины и Космического агентства Франции (Le Centre National d'Etudes Spaciales — CNES) (INTAS Collaborative Call with CNES and NSAU on Space Technologies INTAS-06-100024-9100).

Разработанная технология входит в состав информационного инструментария создавае-

мой в настоящее время в Украине межведомственной информационной системы GEO/UA (украинский сегмент GMES/Коперникус) [5, 18, 20].

Исходя из поставленной цели, в рамках проекта были сформулированы следующие научные задачи:

- определить многоуровневую номенклатуру классов земных покрытий применительно к задачам регионального уровня;
- определить дешифровочные признаки для каждого элементарного класса земных покрытий и объектов сложных классов;
- разработать модели и алгоритмы предварительной обработки и классификации;
- создать многоуровневую модель классификационных процедур;
- разработать пост-классификационные модели;
- разработать методику валидации результатов классификации.

Ниже кратко изложены основные результаты, полученные в проекте.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Работы по выполнению поставленных в проекте задач были структурированы в шесть рабочих пакетов (WP).

WP1. Управление проектом. Управление проектом осуществлялось координатором от Евросоюза — Геоинформационной компанией Gisat. Техническим координатором работ выступало Государственное предприятие «Днепрокосмос».

WP2. Определение требований к номенклатуре и характеристикам классов. Многоцелевой характер использования земных покрытий обуславливает необходимость оптимизации структуры и характеристик классов. Оптимизация построена на разумном компромиссе между реальными возможностями автоматизированной классификации, интерпретационными возможностями космических снимков (размеры пиксела 15–30 м) и национальными требованиями к картированию земных покрытий. Исходя из этих соображений, в качестве базовых выбраны 22 класса из 44 CLC-классов [8], их названия даны в табл. 1 курсивом. При этом, как можно ви-

деть из табл. 2, задаются значительно более «жесткие» требования к минимальной картируемой площади. По результатам предварительных классификационных испытаний удалось выделить дополнительные классы 4-го уровня, представляющие интерес для региональных и локальных пользователей (четвертый столбец табл. 1).

Для реализации автоматизированной технологии классификации земных покрытий в качестве базовой программной среды проекта были выбраны средства ENVI [<http://www.itvis.com>] и Definiens [<http://www.definiens.com>].

В соответствии с имеющимся опытом разработку моделей классов группы 1 (искусственные поверхности) проводило ГП «Днепрокосмос» [1, 23], групп 2 (сельскохозяйственные земли) и 5 (водные объекты) — Институт агроэкологии УААН [20, 21], групп 3 (леса и полуприродные области) и 4 (заболоченные и непригодные для хозяйствования земли) — Научный центр аэрокосмических исследований Земли НАН Украины [4, 6, 17].

В проекте также участвовали сотрудники Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск (в части разработки новых моделей и алгоритмов предварительной обработки изображений) и Датского института сельскохозяйственных наук, г. Тьеле (в части разработки проекта классификации сельскохозяйственных земель).

WP3. Системный анализ и проектирование моделей обработки. Предложенная логическая модель обработки включает следующие группы операций:

- предварительная обработка данных;
- собственно классификация и пост-классификация;
- валидация результатов классификации.

В качестве основного источника данных ДЗЗ были использованы многоспектральные снимки ASTER, а именно, три канала видимого и ближнего ИК-диапазонов (VNIR) с размером пиксела 15 м и шесть каналов среднего ИК-диапазона (SWIR) с размером пиксела 30 м.

В рамках проекта были разработаны новые модели и алгоритмы предварительной обработки, которые обеспечивают:

- повышение пространственного разрешения данных ASTER в шести спектральных диапазонах SWIR до разрешения данных VNIR-диапазона. Для решения этой задачи авторами предложены две модели. Первая основана на расчете статистических характеристик спектральных сигнатур базовых классов земных покровов и апостериорных оценок вероятностей [10, 16]. Указанная модель используется для расчета нормализованных межканальных индексов (NSDI). Вторая модель основана на вейвлетных преобразованиях исходных спектральных яркостей и последующем синтезе изображения по критерию максимума сигнальной энтропии [14];

- выделение на снимке тематического слоя помеховых объектов (облака, тени от облаков) и тематического слоя протяженных линейных объектов типа дорог [1, 19, 23];

- определение оптимального подмножества NSDI, обеспечивающего максимальную разделимость сигнатур обучающих выборок;

- формирование дополнительных (виртуальных) спектральных каналов в синей области спектра (перед первым каналом аппаратуры ASTER) и в среднем ИК-диапазоне (за девятым каналом).

На основе предварительных классификационных испытаний для различных тестовых участков были предложены и апробированы дополнительно к данным ASTER устойчивые растровые слои:

- Variance b1 — нормированный текстурный индекс Variance для первого канала ASTER;

- NDVI — нормированный вегетационный индекс;

- NI 1-2 — нормализованный межканальный индекс, в данном случае межканальный индекс 1 и 2 каналов;

- WI — нормированный водный индекс (отношение суммы спектральных яркостей в первых двух каналах к сумме яркостей в 3–9 каналах);

- Road — изображение векторного слоя дорог.

Использование этих характеристик позволяет обеспечить полную или частичную инвариантность признаков к нежелательным аддитивным и мультипликативным искажениям, характерным для исходных спектральных яркостей.

Следует отметить, что для однородных площадных объектов произвольной формы, в основном природного происхождения («леса и полуприродные области» или «заболоченные территории»), основными дешифровочными признаками являются статистические характеристики многомерных полей спектральных яркостей или производные от них индексные характеристики. Поэтому определение подобных объектов возможно проводить на этапе предварительной обработки с использованием пиксел-ориентированных методов классификации, а именно метода максимального правдоподобия с обучением на тестовых участках, которые выбираются оператором. При этом в качестве дешифровочных признаков использовался оптимизированный набор относительно устойчивых нормализованных межканальных индексов (рис. 1).

Более общая и универсальная модель классификации основана на объектно-ориентированном анализе изображения (OBIA). Объектно-ориентированный анализ основан на том положении, что важная семантическая информация, необходимая для интерпретации изображения, содержится не в каком-либо отдельном пикселе, а в значимом объекте изображения, представленном полигоном однородных пикселей, и во взаимных отношениях между объектами [15].

Многоуровневая сегментация изображения позволяет сконструировать иерархическую структуру объектов изображения, от больших (на верхнем уровне) до мелких, вплоть до объектов пиксельного размера на самом низком уровне. При этом каждый объект на любом промежуточном уровне состоит из субобъектов, расположенных на более низких уровнях, и в то же время сам является субобъектом по отношению к объектам более высоких уровней (супер-объектам). Иерархические отношения «суперобъекты — объекты — субобъекты» являются важными дешифровочными признаками, например, при выделении объектов комплексных классов.

Процесс сегментации и последующей классификации может повторяться многократно, каждый раз со своим набором классов и новым набором признаков. Это открывает путь для

многошагового процесса классификации, начиная от объектов простых однородных классов (вода, лес, песок) и заканчивая объектами сложных и комплексных классов (городская застройка, смешанные леса, гетерогенные сельскохозяйственные области, порты и др.).

TLCC-технология на этапе объектно-ориентированного анализа использует многоуровневую сегментацию со значениями параметра масштабности объектов, равными 30, 10, 7, 5, 3, 2. Соответственно сегментированные изображения были получены на уровнях р30 (большие объекты), р10, р7, р5, р3, р2 (малые объекты). Для сегментации были использованы три первых спектральных канала с весом 1 и растровый тематический слой «дороги» с весом 3. Для всех уровней сегментации коэффициент формы принят равным 0.1, коэффициент компактности — 0.5.

Дальнейший объектно-ориентированный анализ данных включает многошаговый процесс классификации.

1-й шаг. Выделение водных объектов (класс 51) и протяженных вегетирующих объектов типа лесополос (класс 2441).

2-й шаг. Повторная сегментация сцены с использованием созданных тематических слоев 51 и 2441.

3-й шаг. Предварительная классификация сцены по набору вспомогательных классов.

4-й шаг. Выделение элементарных объектов (примитивов) для сложных комплексных классов, например классов городской застройки 111 и 112.

5-й шаг. Выделение объектов сложных комплексных классов в виде сборок примитивов в определенных пропорциях.

6-й шаг. Окончательная классификация по заданной номенклатуре классов путем сборки на одном иерархическом уровне объектов различных классов.

Примеры реализации указанных шагов представлены на цветной вкладке (см. последовательно рис. 2–5).

Объектно-ориентированный анализ используется также и для пост-классификации в TLCC-технологии, что предполагает:

- слияние соседних объектов одного класса в один объект;

- генерализацию мелких (с площадями, меньше чем минимально картируемая площадь объекта) соседних объектов разных классов в один объект по особым правилам, устанавливаемым пользователем.

В рамках проекта предложена унифицированная модель пост-классификации для различных приложений, основанная на понятиях приоритетного класса и матрицы ранговых предпочтений.

WP4. Реализация модели классификации. Основной целью этой задачи является следование схеме классификации, правилам и методам, которые являются результатом выполнения задачи WP3. В рамках проекта были разработаны и апробированы новые модели и алгоритмы, в том числе:

- девять программных модулей для предварительной обработки,

- более 30 функций для описания дешифровочных признаков.

Был также создан и отработан по результатам классификационных испытаний пакет проектной, программной и эксплуатационной документации в следующем составе поставочных продуктов:

1. INTAS-06-100024-9100/ D2 TLCC Nomenclature: object based structure and characteristics of classes, 2008.—47 p.

2. INTAS-06-100024-9100/D3.1 Common classification model, 2008.—33 p.

3. INTAS-06-100024-9100/D3.2 Preprocessing & polygon delineation. Models and algorithms, 2008.—40 p.

4. INTAS-06-100024-9100/D3.3 Post-classification model and algorithms, 2008.—23 p.

5. INTAS-06-100024-9100/D3.4 Logical schema of overall data processing (TLCC model), 2008.—28 p.

6. INTAS-06-100024-9100/D4.1 New Program Modules, 2008.—45 p.

7. INTAS-06-100024-9100/D4.2.1 TLCC user's guide «Pre-processing with ENVI», 2008.—44 p.

8. INTAS-06-100024-9100/D4.2.2 TLCC user's guide «Classification» with Definiens, 2008.—60 p.

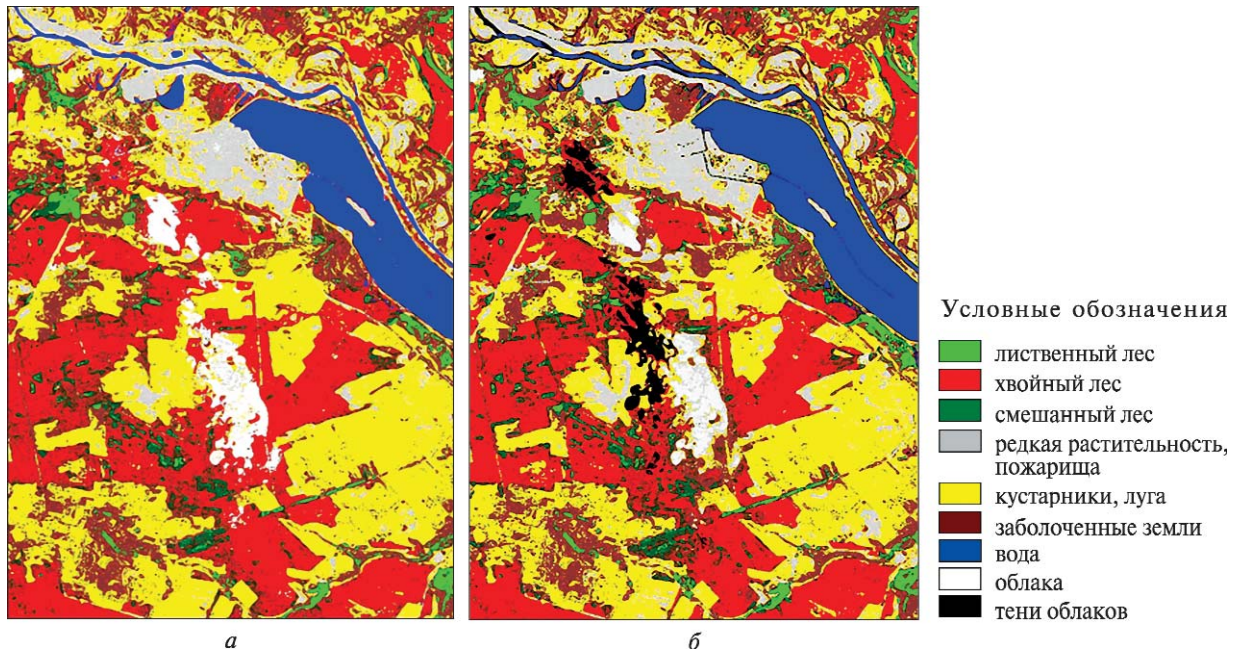


Рис. 1. Результаты автоматизированной классификации в пределах Чернобыльского полигона: по сигнатурам на основе полного набора нормализованных индексов (а), по сигнатурам на основе спектральных яркостей (б).

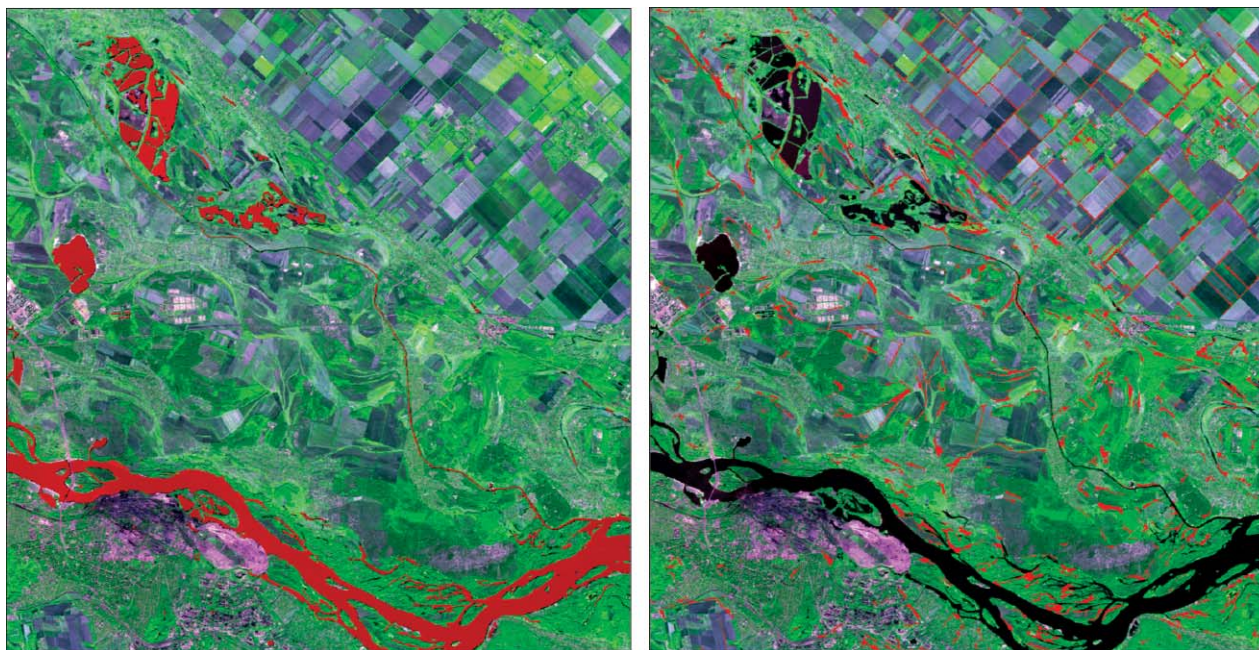


Рис. 2. Шаг 1: класс водных объектов выделен красным цветом (слева); класс лесозащитных полос выделен красным цветом (справа)



Рис. 3. Шаг 3: результат предварительной классификации

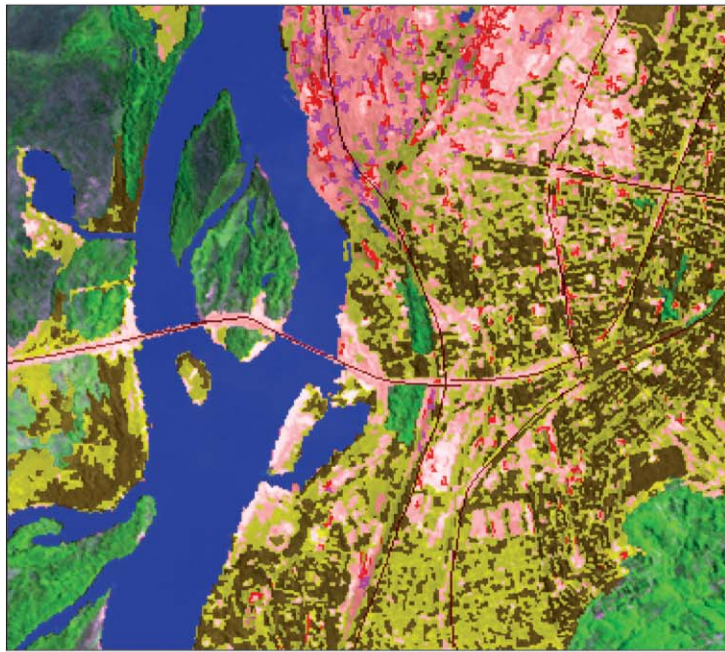


Рис. 4. Шаг 4: результат классификации урбанизированной территории (элементы застройки)

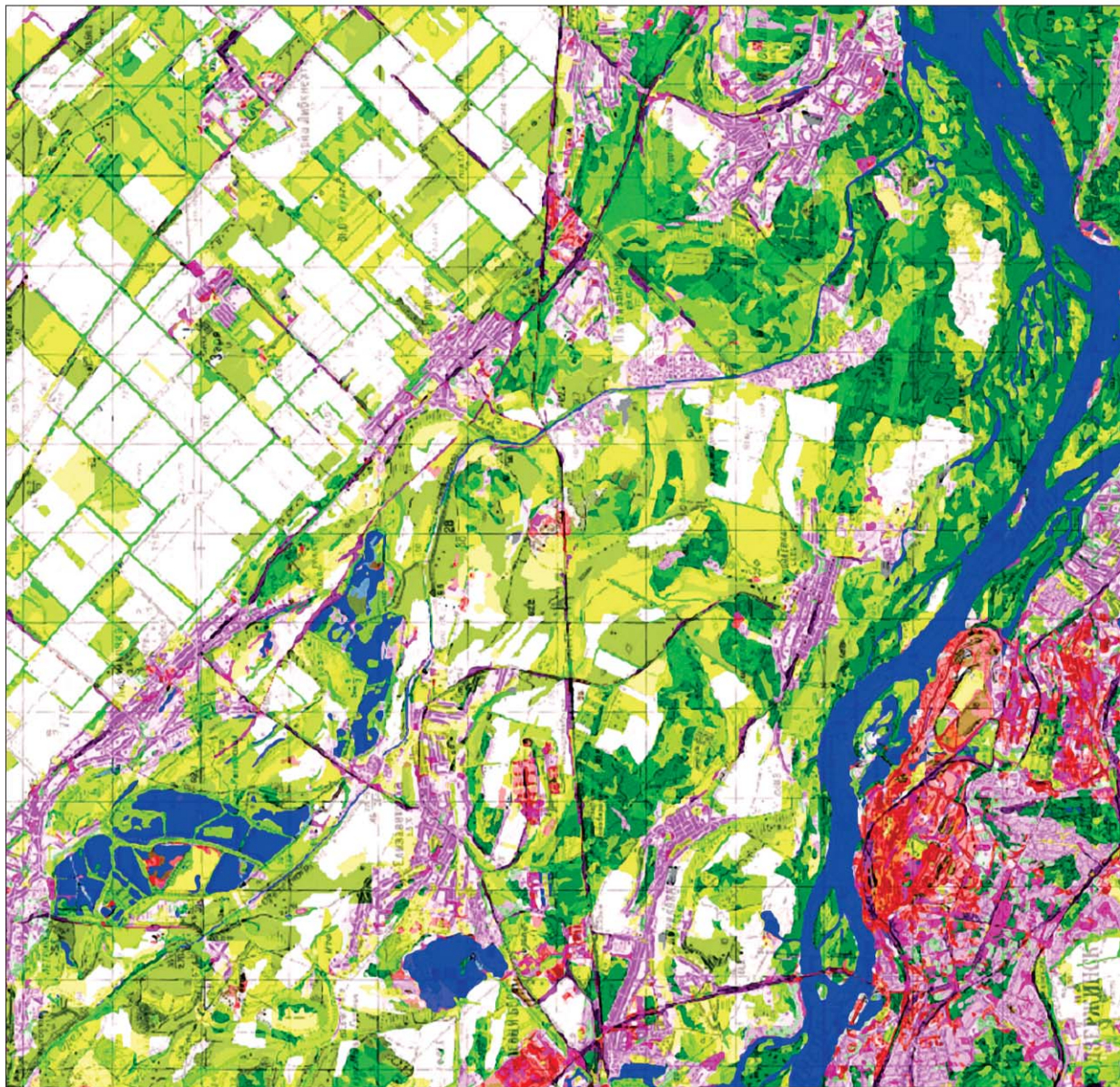


Рис. 5. Шаг 6: тематическая карта земельных покрытий (совмещена с топографической картой)

9. INTAS-06-100024-9100/D4.2.3 «Post-Classification» TLCC user's guide, 2008.—12 p.

10. INTAS-06-100024-9100/D5.1a TLCC Validation Technique, 2008.—13 p.

11. INTAS-06-100024-9100/D5.1b TLCC Validation Guide, 2008.—21 p.

12. INTAS-06-100024-9100/D5.2 The summary report on classification trials realization, 2008.—49 p.

WP5. Проведение классификационных испытаний и обработка технологий. В рамках этой задачи была разработана и апробирована методика валидации результатов классификации земных покрытий и соответствующее руководство пользователя.

Классификационные испытания проводились в два этапа. На первом (предварительном) этапе для различных тестовых участков проводилась отработка проектных моделей и эксплуатационной документации.

Предварительные классификационные испытания на отдельных тестовых участках показали следующее.

1. Решающие правила для объектно-ориентированной классификации работают достаточно устойчиво. При выделении простых однородных классов (вода, песок) целесообразно проводить в интерактивном режиме настройку порогов решающих правил (без изменения самих правил).

2. Точность пиксел-ориентированной классификации для классов природных объектов «леса и полуприродные области» и «заболоченные территории» составляет около 88 %.

3. Для формирования устойчивых слоев изображения рекомендовано использовать преобразования к нормированным межканальным индексам как более физически обоснованный метод слияния каналов (по сравнению с вейвлетными преобразованиями).

4. Качество сегментации изображения существенно улучшается при использовании отдельных тематических слоев; в частности, в данной модели был использован тематический слой дорог.

На заключительном этапе классификация проводилась по единой согласованной и документированной технологии.

Оценка точности классификации была проведена на основе [3, 7, 13] с использованием заверочных точек. Вначале был выполнен расчет количества репрезентативных точек. Точки были случайно расположены в пределах классифицированной области с учетом равномерного охвата каждого класса.

По результатам сравнения с заверочными данными построены матрицы ошибок, что позволило оценить точность автоматизированного выделения различных классов и общую точность классификации для рассматриваемых тестовых участков [3].

Общая точность классификации составляет 88.36...92.28 %, коэффициент Карра 0.87... 0.91.

WP6. Распространение результатов. 1. Промежуточные и окончательные результаты работ по проекту публиковались в научной периодике и докладывались на международных конференциях в Австрии (Грац), Венгрии (Цеглед), Словении (Марибор), Беларуси (Минск), Германии (Потсдам), Украине (Киев, Днепропетровск, Ялта, Алушта). На одну из разработок в рамках проекта получен патент на изобретение [2].

2. За время выполнения проекта подготовлены презентации и проведены встречи с потенциальными пользователями: Украинская академия аграрных наук, Министерство аграрной политики, Государственная служба геодезии, картографии и кадастра, Государственный комитет лесного хозяйства.

4. Проведено три семинара со специалистами компании Rapid Eye AG (Германия), располагающей собственной действующей группировкой из пяти спутников для оптических наблюдений Земли. Между ГП «Днепркосмос» и компанией Rapid Eye AG подписан Меморандум о долгосрочном сотрудничестве в области использования материалов космических съемок и создания соответствующих технологий [<http://www.rapideye.de/home/pres-release-archive/>]. В настоящее время этими организациями подготовлены и находятся на согласовании предложения по реализации совместных пилотных проектов в области:

- сельского хозяйства (с участием институтов УААН);

• картографии (с участием Института геодезии и картографии).

Предусматривается, что в обоих проектах будут использоваться TLCC-технологии. Настоящую статью также можно рассматривать как шаг в реализации задачи WP6.

Дальнейшие направления развития TLCC-технологии предполагают:

1. адаптацию технологии TLCC к данным от перспективных КС «Сич-2», «RapidEye», «Sentinel-2»;

2. адаптацию технологии TLCC к данным дистанционного зондирования высокой разрешающей способности (IKONOS, «QuickBird», «GeoEye»);

3. стандартизацию спецификации классов земных покрытий для Украины;

4. создание на основе технологии TLCC специализированных информационных служб в области картографии, сельского и лесного хозяйства как элементов системы GEO-UA;

5. координацию собственных разработок и проектов в области дистанционного зондирования Земли и исследований земных покровов с европейскими партнерами в рамках действующих международных проектов (GMES/Corine, GEOSS, LMCS, GeoLand, INTERREG, INSPIRE и др.).

ВЫВОДЫ

1. Выполненный проект «Модель и автоматизированная технология классификации земных покрытий» является важным шагом в создании межведомственной информационной системы GEO-UA и развитии международного сотрудничества в этой сфере деятельности.

2. Разработанный в рамках проекта комплект поставочной документации по TLCC-технологии открывает хорошие перспективы ее использования в самых разных областях народного хозяйства, а также при решении научных задач.

1. Бушуев Е. И., Волошин В. И., Паршина О. И. Модель классификации земных покровов в управлении территорией // Матер. IV-й междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы природопользования, устойчивого развития и техногенной безопасности регионов». — Днепропетровск, 2007. — С. 26–27.

2. Пат. України на винахід № 81195. Спосіб підвищення спектральної розрізненості багатоспектральних аерокосмічних зображень / М. О. Попов, С. А. Станкевич, А. О. Козлова. — 2007. — 12 с.

3. Попов М. А. Методология оценки точности классификации объектов на космических изображениях // Проблемы управления и информатики. — 2007. — № 1. — С. 97–103.

4. Попов М. А., Сахацкий А. И., Станкевич С. А., Козлова А. А. Автоматизированная контекстная классификация заболоченных территорий по материалам космической съемки // Зб. матер. XII міжнар. наук.-техн. симп. «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS- і GIS-технології». — Алушта: Львівське астрономо-геодезичне товариство, 2007. — С. 72–75.

5. Попов М. А., Станкевич С. А., Подорван В. Н. Программно-технологический подход в задаче классификации земных покровов на основе гиперспектральных космических снимков // Матер. Першої наук. конф. «Науки про Землю та космос — суспільству». — Київ: ЦАКДЗ ІГН НАН України, 2007. — С. 122.

6. Попов М. А., Станкевич С. А., Сахацкий А. И., Козлова А. А. Использование полного набора нормализованных межканальных индексов многоспектральных космических изображений при классификации покрытий ландшафта // Уч. зап. Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского. — 2007. — 20 (59), № 1. — С. 175–182.

7. Попов М. О., Цимбал Т. В. Правила та процедура сертифікації методик використання даних дистанційного зондування Землі при вирішенні тематичних задач // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 4. — С. 104–112.

8. Соукап Т., Бушуев Е., Попов М. и др. Номенклатура базовых классов земных покрытий и основные подходы к их автоматизированной классификации по данным дистанционного зондирования // Матер. XII междунар. науч.-практ. симп. «Геоінформаційний моніторинг оточуючої середовища: GPS- і GIS-технології», 10–15 вересня 2007. — Алушта, 2007. — С. 38–39.

9. Соукап Т., Бушуев Е., Попов М. и др. Модель и технология автоматизированной классификации земных покрытий по данным дистанционного зондирования // Матер. III Белорусского космич. конгресса, 23–25 октября 2007, Минск. — Минск: ОИПИ НАН Белорусии, 2007. — С. 214–219.

10. Станкевич С. А., Сахацкий О. И., Козлова А. О. Клаسیфікування покриттів ландшафту з використанням повного набору нормалізованих міжканальних індексів і додаткових контекстуальних ознак // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 2. — С. 28–31.

11. Bossard M., Feranec J., Otahel J. The revised and supplemented Corine Land Cover nomenclature // Techn. Rept EEA. — 2000. — N 38. — 110 p.

12. *Büttner G., Feranec J., Jaffrain G., et al.* The CORINE Land Cover 2000 Project // EARSeL Proceedings 3(3). — 2004. — P. 331–346.
13. *Congalton R. G., Green K.* Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. — CRC Press, Taylor & Francis Group, 1999. — 137 p.
14. *Korchinsky V. M., Voloshyn V. I.* The Novel Method for Improvement of Information Density in Satellite-acquired Multispectral Images // ISDE-2008 Summit, Potsdam, Germany, 14–17 November, 2008. — CD.
15. *Navulur K.* Multispectral Image analysis using the object-oriented paradigm. — N.Y.: CRC Press, 2007. — 166 p.
16. *Popov M. A., Stankevich S. A., Sakhatsky A. I., Kozlova A. A.* Multispectral imagery normalized band-difference indexes for land cover classification // Proceedings of ISDE 2008 Summit on Geoinformatics: Tools for Global Change Research. — Potsdam: Wichmann Verlag, 2008. — P. 333–338.
17. *Popov M. A., Stankevich S. A., Sakhatsky A. I., Kozlova A. A.* Land cover contextual classification using space imagery for wetland and forest monitoring // Proceedings of the United Nations/Austria/European Space Agency Symp. «Space Tools and Solutions for Monitoring the Atmosphere and Land Cover»; Graz (Austria), 9–12 September, 2008. — Graz, 2008.
18. *Soukup T., Bushuyev Ye., Popov M., et al.* Technology of automated land cover classification based on the remote sensing data // 1st Workshop GMES Twinning Ukraine, Kiev, 26–27 November, 2008. — CD.
19. *Starovoitov V., Makarau A.* Multispectral Image Pre-Processing for Interactive Satellite Image Classification // ISDE-2008 Summit, Potsdam, 14–17 November, 2008. — CD.
20. *Tarariko O., Syrotenko O.* Monitoring and Forecasting of Agri-resources by Means of Remote Sensing of the Earth (AGROKOSMOS) // 1st Workshop GMES Twinning Ukraine, Kiev, 26–27 November, 2008. — CD.
21. *Tarariko O., Syrotenko O., Grekov V.* Net of the Agrarian Testing Polygons in System of Remote Monitoring of Agrarian Resources in Ukraine // ISDE-2008 Summit, Potsdam, 14–17 November, 2008. — CD.
22. *The thematic accuracy of Corine land cover 2000. Assessment using LUCAS (land use/cover area frame statistical survey) // Techn. Rept. EEA. — 2006. — N 7. — 85 p. — (www.eea.europa.eu).*
23. *Voloshyn V. I., Bushuyev Y. I., Stefanishin Y. I.* Role of remote sensing of the Earth in development of a national infrastructure of the spatial data. // Proceedings of the Conference INSPIRE-2008, Maribor, Slovenia, 23–25 June, 2008. — CD.

Поступила в редакцію 20.02.09

L. Brodsky, E. I. Bushuev, V. I. Voloshin, A. A. Kozlova, O. I. Parshina, M. A. Popov, V. I. Sablina, A. I. Sakhatskii, A. V. Sirotenko, T. Soukup, S. A. Stankevich, A. G. Tarariko

THE INTAS PROJECT FOR THE ELABORATION OF AUTOMATED TECHNOLOGY OF LAND COVER CLASSIFICATION: THE SCIENTIFIC PROBLEMS, MAIN RESULTS AND PROSPECTS

The basic results of the INTAS project devoted to the automated technology of land cover classification are presented. The project was carried out in 2007–2008 and was supported by the National Space Agency of Ukraine and the Space Agency of France (Le Centre National d'Etudes Spaciales). Multispectral space imagery of land surface with details from 15 to 30 m makes the basis of the developed technology. The end information products of the developed technology are earth site maps with the object nomenclature harmonized with the CORINE Land Cover Classification System.

UDC 549.903

**N. Kussul¹, L. Hluchy², A. Shelestov¹, S. Skakun¹,
O. Kravchenko¹, M. Ilin¹, Yu. Gripich¹, A. Lavrenyuk¹**

¹Space Research Institute NASU-NSAU
inform@ikd.kiev.ua

²Institute of Informatics SAV
hluchy.ui@savba.sk

DATA FUSION GRID SEGMENT

This paper presents a Grid infrastructure that is being developed at the Space Research Institute NASU-NSAU, and integrates the resources of several geographically distributed organizations. The use of Grid technologies is motivated by the need to make computations in the near real-time for fast response to natural disasters and to manage large volumes of satellite data. We use the Grid infrastructure for a number of applications that heavily rely on Earth observation data. The applications include: weather prediction, flood monitoring, biodiversity assessment, crop yield prediction, and Earth land parameters estimation.

INTRODUCTION

At present, global climate changes in the world made a rational land use, environmental monitoring, prediction of natural and technological disasters the tasks of a great importance. The basis for the solution of these problems is an integrated use of data of different nature: modelling data, in-situ measurements, and indirect observations such as airborne and space-borne remote sensing data.

Satellite observations have an advantage of acquiring data for large and hard-to-reach territories, and providing continuous and human-independent measurements. Such important applications like monitoring and predictions of floods, droughts, vegetation state assessment heavily rely on the use of Earth observation (EO) data from space. For example, the satellite-derived flood extent is very important for calibration and validation of hydraulic models to reconstruct what happened during the flood and determine what caused the water to go where it did [8]. Information on flood extent provided in the near real-time (NRT) can be also used for damage assessment and risk management, and can benefit to rescuers during the flooding [2]. Both

microwave and optical data can provide means to detect drought conditions, estimate drought extent and assess the damage caused by the drought events [9, 17]. To assess vegetation health/stress, optical remote sensing data can be used to derive biophysical and biochemical variables. Such variables include pigment concentration (e.g. chlorophyll a+b), leaf structure, dry matter content (e.g. lignin, cellulose, protein), water content at leaf level and leaf area index (LAI), leaf angle distribution (LAD), fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) at canopy level [13].

It should be emphasized that the same EO data sets and derived products can be used for a number of applications. For example, information on land use/change, soil properties, meteorological conditions is both important for floods and droughts applications as well as vegetation state assessment. That is, once we develop interfaces to access the required data and products, it can be used in a uniform way for different purposes and applications. Services and models that are common for different EO applications (e. g. flood monitoring and crop yield prediction) are shown in Fig. 1.

The EO domain is characterized by the large volumes of datasets that should be processed, catalogued, and archived [6, 16]. For example, GOME instrument onboard Envisat satellite generates near-

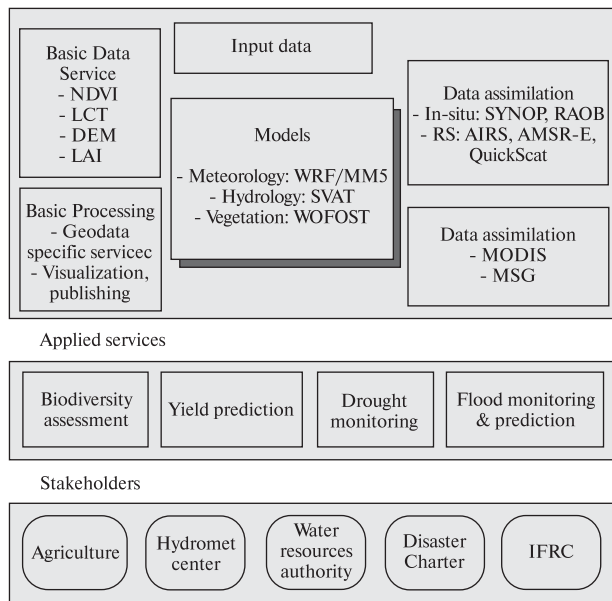


Fig. 1. Common services and models for a variety of applications

ly 400 Tb data per year [7]. The processing of satellite data is carried out not by the single application with monolithic code, but by the distributed applications. This process can be viewed as a complex workflow [3] that is composed of many tasks: geometric and radiometric calibration, filtration, reprojection, composites construction, classification, products development, post-processing, and visualization to the end-users. For example, calibration and mosaic composition of 80 images generated by ASAR instrument onboard Envisat satellite takes 3 days on 10 workstations of Earth Science GRID on Demand that is being developed at ESA and ESRIN [6]. This mosaic covers all Europe at 90 meters resolution, and corresponding products are automatically orthorectified using Digital Elevation Model (DEM). Dealing with EO data, we have to also consider security issues regarding satellite data policy, the need for processing in NRT for fast response within international programs and initiatives for disaster monitoring, in particular the International Charter «Space and Major Disasters» and the International Federation of Red Cross.

Hence, all these factors, such as the need for processing data in NRT, the need for managing large volumes of satellite data and derived products and

providing a uniform access to them, lead to the use of Grid technologies [5, 6, 16]. In this case, a Grid environment is considered not only for providing high-performance computations, but, in fact, can facilitate interactions between different actors by providing a standard infrastructure and a collaborative framework to share data, algorithms, storage resources, and processing capabilities [6].

In this paper, we focus on the description of the Grid environment that is under development on the basis of the concept from Fig. 1 within the INTAS-CNES-NSAU project «Data Fusion Grid Infrastructure». We will also show the number of real-world applications that are solved with the use of the Grid infrastructure, in particular weather prediction, flood monitoring, biodiversity assessment, crop yield prediction, and Earth land parameters estimation.

APPLIED SERVICES WITHIN GRID

In this section we review applications that are solved using the resources of the Grid system.

Weather prediction. Weather forecast data is used in the core models of flood monitoring and crop state prediction applications in the Grid environment. The numeric weather prediction model WRF (Weather Research & Forecasting Model, <http://www.wrf-model.org>) was configured and adapted to the territory of Ukraine [10]. Currently, we routinely produce 72-hours forecasts every 6 hour with a spatial resolution of 10 km. With such configuration, the model runs approximately 6 hours on the Grid's SCIT-3 supercomputer at the Institute of Cyber netics (total 300 Intel Xeon 3.0 GHz cores) and produces approximately 5 Gb of output data. The visualization interface for the model is depicted in Fig. 2.

Flood monitoring. We developed a neural network approach to the flood extent extraction from satellite synthetic-aperture radar (SAR) imagery [12]. We developed a parallel version of our method that can be run on several computational nodes in the Grid. The use of the Grids allowed us to considerably reduce the time required for image processing. In particular, it took approximately 30 min to process a single SAR image on a single workstation. The use of Grid computing resources allowed us to reduce the time to less than 1 min. The developed Web service is

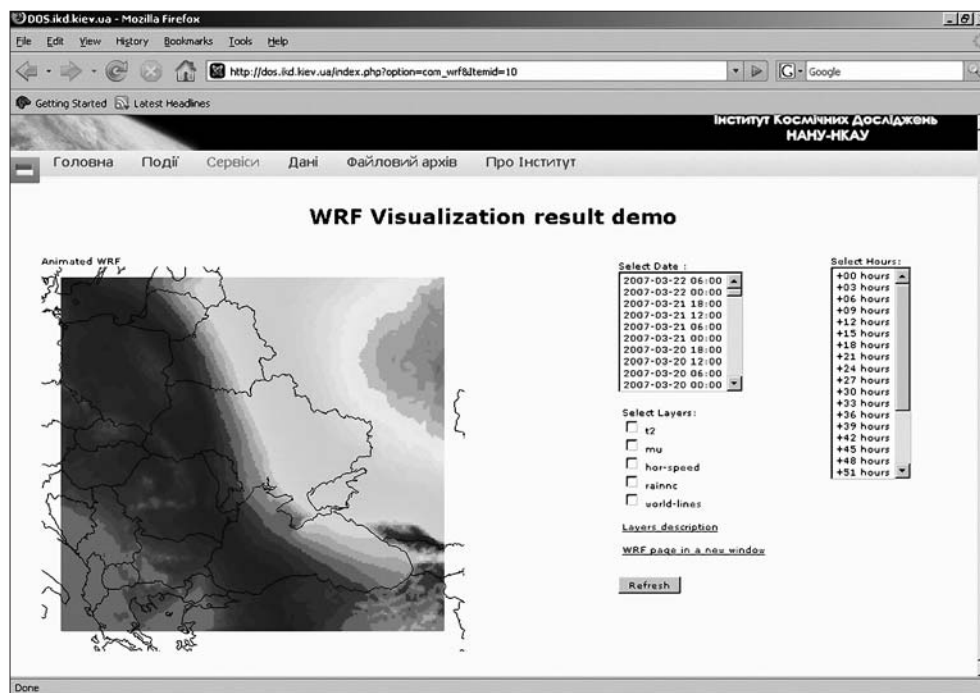


Fig. 2. Forecasts of the pressure using WRF model

accessible via Internet through the address <http://floods.ikd.kiev.ua> (Fig. 3).

Land biodiversity assessment. In collaboration with scientists from the Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the National Academy of Sciences of Ukraine we have developed an approach for land biodiversity assessment and mapping using Earth observation data [15]. The proposed approach was developed for the Pre-Black Sea region, but, in general, can be extended to any other region. We developed a Web service for biodiversity monitoring that enables regular and operational acquisition of biodiversity estimates for the Pre-Black Sea region and allows one to track changes in its values. This, in turn, reveals negative changes in the environment of the given region and provides adequate information on biodiversity hot-spots. The developed Web service is accessible via Internet through the address <http://biodiv.ikd.kiev.ua> (Fig. 4).

Crop yield prediction. We implemented a time series analysis of vegetation index approach for yield prediction and vegetation state assessment [11]. As a basis, we use the enhanced vegetation index (EVI). Crop state estimation requires analysis of 217 Mb of

data per run, and yield prediction requires approximately 4 Gb per run, which takes approximately 30 min in the Grid infrastructure. Estimation is started routinely for the next 16 days. Reanalysis and model real-time calibration requires nearly 20 Gb of historical data processing, and is started at least once per

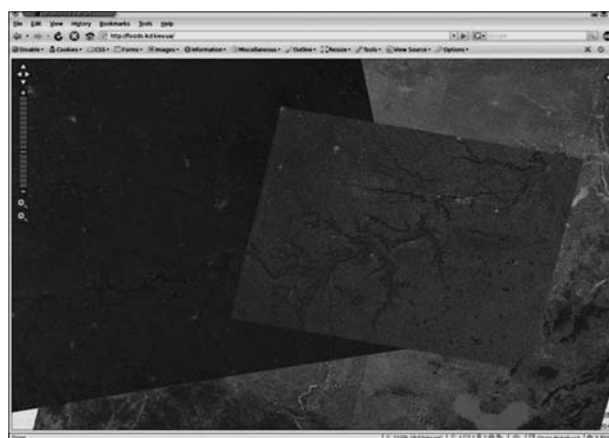


Fig. 3. Flood application within the Grid infrastructure. Flood event: River Huaihe, China, July, 2007. Data sources: Envisat/ASAR (© ESA, 2007) and RADARSAT-1 (© CSA, 2007)

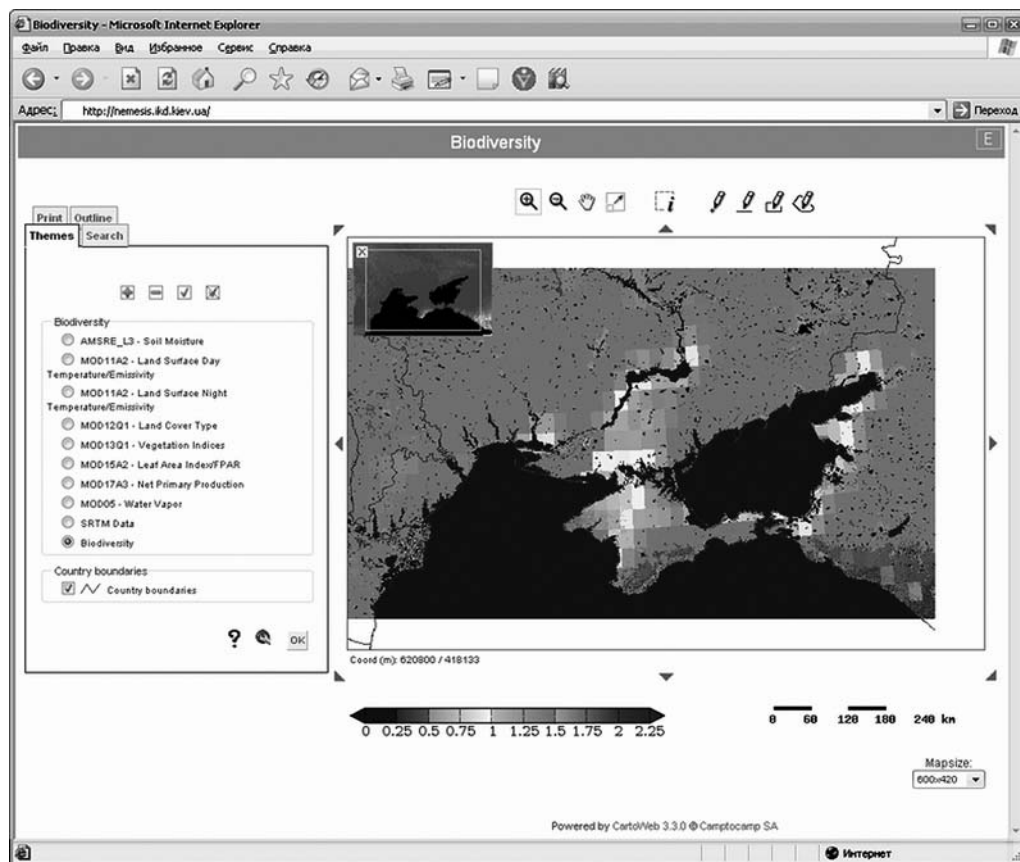


Fig. 4. Demonstration of Web service for biodiversity assessment using EO data products for the Pre-Black Sea region of Ukraine

harvest. The WOFOST model is used with the assimilation of Leaf Area Index (LAI) derived from satellite observations. The visualization interface for the developed services is shown in Fig. 5.

Earth land parameters estimation using optical remote sensing data. We developed a method for plant

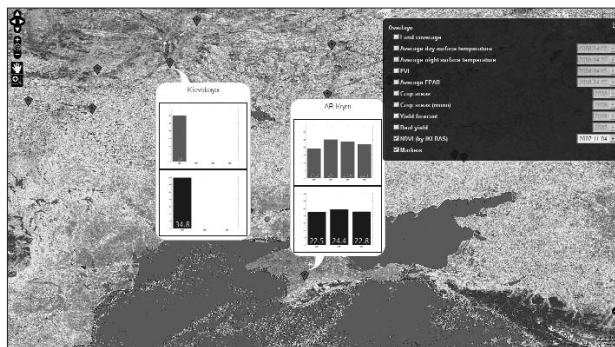


Fig. 5. Wheat yield forecast (Ukraine, 2008)

moisture estimation using optical remote sensing data. This information is valuable for vegetation stress assessment and drought monitoring, as well as for non-destructive moisture measurements at a field level. The proposed method consists in solving inverse problem for a canopy radiative transfer model. That is, given top of canopy reflectance in several bands in optical domain to find canopy parameters or parameters of canopy leaves, such as Equivalent Water Thickness (EWT) [13]. We use coupled leaf-canopy radiative transfer model that consists of PROSPECT [4] leaf optics model and SAILH canopy model. As input for inversion procedure, satellite measurements with atmospheric correction can be used (such as MODIS, product MOD09) or field measurements for inversion at leaf level.

To solve the inverse problem a neural network was used, namely Mixture Density Network [1]. Such

network can estimate an inverse operator and an error of inversion procedure for each given set of reflectance. This is done through estimation of a posterior probability of canopy parameter given set of reflectance. In comparison with other methods, such as iterative optimization, our approach is much faster, while in comparison with traditional neural networks, we can estimate an error of inversion for each given input and not just an average one. Our method can be seen as a valuable alternative to lookup tables approach with a slightly different quality/performance ratio. An example of results of inversion for PROSPECT model is shown in Fig. 6. Reflectance and moisture data (C_w parameter in terms of PROSPECT model) is taken from LOPEX93 spectra database.

DESCRIPTION OF THE GRID INFRASTRUCTURE

The Grid infrastructure (that is being developed within INTAS-CNES-NSAU project «Data Fusion Grid Infrastructure») integrates the resources of geographically distributed organisations, in particular:

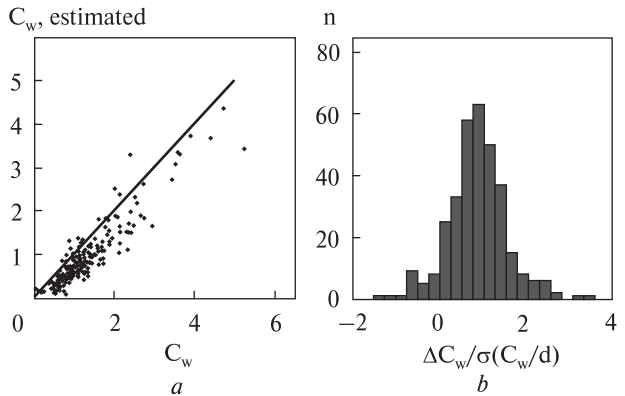


Fig. 6. Results of inversion of PROSPECT model: *a* — plot of estimated moisture parameter C_w vs. measured values, *b* — histogram of an error of estimation divided by estimation of a standard deviation

- Space Research Institute NASU-NSAU (Ukraine) with deployed computational and storage nodes based on Globus Toolkit 4 (<http://www.globus.org>) and gLite 3 (<http://glite.web.cern.ch>) middleware, access to geospatial data and Grid portal;
- Institute of Cybernetics of NASU (Ukraine) with deployed computational and storage nodes

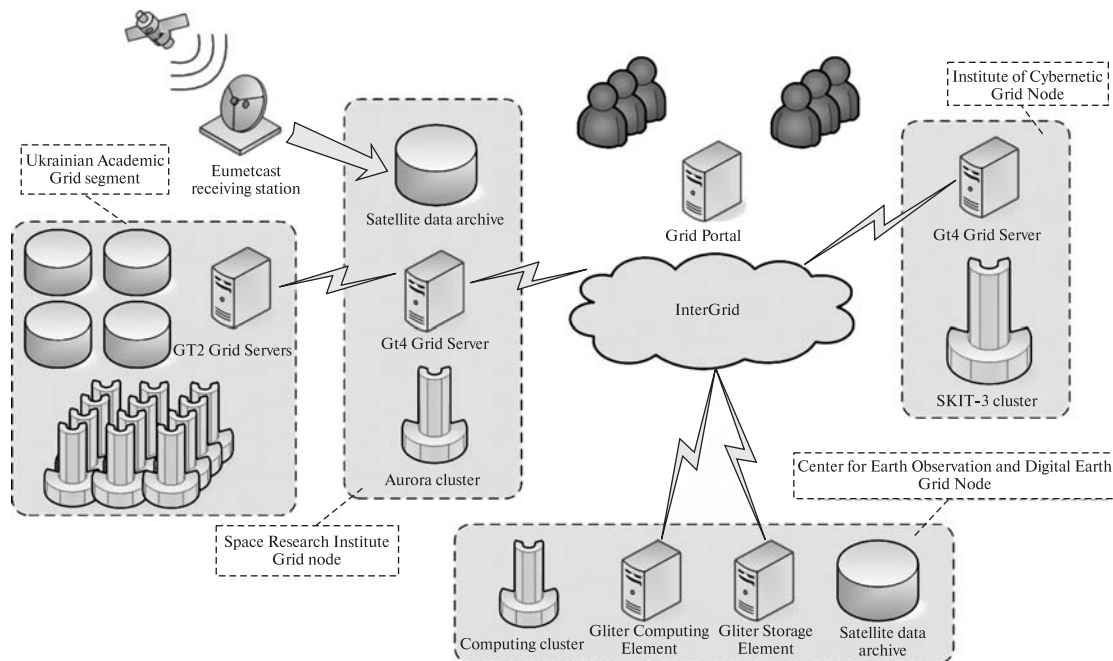


Fig. 7. Architecture of the Grid infrastructure

based on Globus Toolkit 4 middleware and access to computational resources (approximately 500 processors);

- Center for Earth Observation and Digital Earth of the Chinese Academy of Sciences (China) with deployed computational nodes based on gLite 3 middleware and access to geospatial data (approximately 16 processors).

It is worth mentioning that satellite data is distributed through the Grid environment. For example, ENVISAT WSM data (that are used within the flood application) are stored on the ESA's rolling archive and routinely downloaded for the Ukrainian territory. Then, they are stored at the Space Research Institute archive that is accessible via the Grid infrastructure. MODIS data from Terra and Aqua satellites that are used in flood, crop yield and biodiversity assessment applications are routinely downloaded from the USGS' archives and stored at the Space Research Institute NASU-NSAU and Institute of Cybernetics of NASU.

Access to the resources of the Grid environment is organised via a high-level Grid portal that has been deployed using GridSphere framework [14]. Through the portal, users can access the required satellite data and submit jobs to the computing resources of the Grid in order to process satellite imagery. The workflow of the data processing steps in the Grid (such as transformation, calibration, orthorectification, classification etc.) is controlled by a Karajan engine (<http://www.gridworkflow.org/snips/gridworkflow/space/Karajan>).

The existing architecture of the Grid is shown in Fig. 7.

CONCLUSION

In this paper, we presented a Grid infrastructure that is being developed at the Space Research Institute NASU-NSAU and integrates the resources of several geographically distributed organizations: the Space Research Institute NASU-NSAU, the Institute of Cybernetics NASU and the China's Center for Earth Observation and Digital Earth of CAS. The use of Grid technologies is motivated by the need to make computations in the near real-time for fast response to natural disasters and to manage large volumes of satellite data. Currently, we are

using a Grid portal solution based on GridSphere framework to integrate Grid systems with different middleware, such as GT4 and gLite 3. In the future, we plan to implement a metascheduler approach based on a GridWay-like system.

We showed the use of the Grid infrastructure for a number of applications that heavily rely on Earth observation data. The applications include: weather prediction, flood monitoring, biodiversity assessment, crop yield prediction, and Earth land parameters estimation.

Acknowledgments. This work is supported by the joint project of INTAS, the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) and the National Space Agency of Ukraine (NSAU), «Data Fusion Grid Infrastructure» (Ref. Nr 06-1000024-9154), and by the joint project of the Science and Technology Center in Ukraine (STCU) and the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU), «Grid Technologies for Multi-Source Data Integration» (N 4928).

REFERENCES

1. Bishop C. Pattern Recognition and Machine Learning. — New York: Springer, 2006. — 740 p.
2. Corbley K. P. Radar Imagery Proves Valuable in Managing and Analyzing Floods Red River flood demonstrates operational capabilities // Earth Observation Magazine. — 1999. — 8, N 10. — http://www.eonline.com/Common/Archives/1999dec/99dec_corbley.html.
3. DEGREE — Earth Science White Paper on Grids. — http://www.eu-degree.eu/DEGREE/internal-section/wp6/DEGREE-D6.1.2_v2.8.pdf.
4. Feret J. B., François C., Asner G. P., et al. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments // Remote Sens. Environ. — 2008. — 112, N 6. — P. 3030–3043.
5. Foster I. The Grid: A New Infrastructure for 21st Century Science // Phys. Today. — 2002. — 55, N 2. — P. 42–47.
6. Fusco L., Cossu R., Retscher C. Open Grid Services for Envisat and Earth Observation Applications // High performance computing in remote sensing / Eds A. J. Plaza, C.-I. Chang. — New York: Taylor & Francis Group, 2007. — P. 237–280.
7. Fusco L., Goncalves P., Linford J., et al. Putting Earth-Observation on the Grid // ESA Bull. — 2003. — 114. — P. 86–91.
8. Horritt M. S. A methodology for the validation of uncertain flood inundation models // J. Hydrology. — 2006. — 326. — P. 153–165.
9. Kogan F., Stark R., Gitelson A., et al. Derivation of Pasture Biomass in Mongolia from AVHRR-based Vegetation

- Health Indices // *Int. J. Remote Sens.* — 2004. — **25**, N 14. — P. 2889–2896.
10. *Kravchenko O., Kussul N.* Simulation cascade of NWP and land surface model for drought monitoring // European Geosciences Union General Assembly. — Vienna, Austria, 2008. — <http://www.cosis.net/abstracts/EGU2008/00582/EGU2008-A-00582.pdf>.
 11. *Kussul N., Ilin M., Skakun S., Lavrenuk A.* Crop state estimation and winter wheat yield prediction using remote sensing data // *Int. Book Ser.* — 2008. — **3**. — P. 103–109. — (Decision Making and Business Intelligence, Strategies and Techniques / Eds K. Markov, K. Ivanova, I. Mitov).
 12. *Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Kravchenko O.* Data Assimilation Technique for Flood Monitoring and Prediction // *Int. J. Inform. Theory and Applications.* — 2008. — **15**, N 1. — P. 76–84.
 13. *Liang S.* Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. — New Jersey: Wiley, Inc., 2004. — 534 p.
 14. *Novotny J., Russell M., Wehrens O.* GridSphere: An Advanced Portal Framework // *Proc. of the 30th EURO-MICRO Conf.* — 2004. — P. 412–419.
 15. *Popov M., Kussul N., Stankevich S., et al.* Web Service for Biodiversity Estimation Using Remote Sensing Data // *Int. J. Digital Earth.* — 2008. — **1**, N 4. — P. 367–376.
 16. *Shelestov A., Kussul N., Skakun S.* Grid Technologies in Monitoring Systems Based on Satellite Data // *J. Automation and Inf. Sci.* — **38**, N 3. — P. 69–80.
 17. *Wagner W., Pathe C., Sabel D., et al.* Experimental 1 km soil moisture products from ENVISAT ASAR for Southern Africa // *ENVISAT & ERS Symp.* — Montreux, Switzerland, 2007.

Received February 20, 2009

*Н. Куссуль, Л. Глухи, А. Шелестов, С. Скакун,
О. Кравченко, М. Льїн, Ю. Грипич, А. Лавренюк*

РОЗРОБЛЕННЯ НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ІНТЕГРАЦІЇ ДАНИХ НА БАЗІ GRID

Описано Grid-інфраструктуру, яка розробляється в Інституті космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України. Grid-інфраструктура інтегрує обчислювальні та інформаційні ресурси географічно розподілених організацій. Використання Grid-технологій обумовлене необхідністю виконувати обчислення в режимі, наближеному до режиму реального часу, для моніторингу надзвичайних ситуацій та необхідністю управління великими об'ємами даних. Розроблена Grid-інфраструктура використовується для розв'язання низки прикладних задач з використанням даних спостереження Землі, зокрема чисельного прогнозування погоди, моніторингу повеней, оцінки видового біорізноманіття, прогнозування урожайності та оцінки параметрів земної поверхні.

УДК 537.634;537.638;538.91

І. М. Главацький, Н. І. Главацька

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, Київ

ТЕМПЕРАТУРНА ЕВОЛЮЦІЯ МАРТЕНСИТНОЇ СТРУКТУРИ МОНОКРИСТАЛІВ СПЛАВІВ Ni-Mn-Ga

Досліджено температурну стабільність та еволюцію кристалічної та магнітної структури монокристалів сплавів Ni-Mn-Ga-(Cu, Fe) нестехіометричного складу з модульованою (5R) та немодульованою (2M) тетрагональною кристалічними ґратками мартенситної фази та її кореляції з функціональними властивостями. Використано методи рентгенівського дифракційного аналізу, нейтронографії, дилатометрії, низькопольової магнітної сприйнятливості та вимірювання магніто механічних властивостей за допомогою магніто-дилатометричного комплексу високої роздільної здатності (100 нм). Знайдено, що кристалічна структура досліджених мартенситів стабільна в усьому інтервалі температур їхнього існування. Глибоке охолодження (до 4 К) призводить до сильно анізотропної зміни параметрів ґратки, що викликає перестроєння морфології двійникової та магнітної доменної структури мартенситу завдяки релаксації залишкових та термічних напружень. Саме цей факт призводить до різкої зміни магнітних, магніто механічних та транспортних властивостей з охолодженням до температури близько 200 К. Вперше експериментально спостережено антиферромагнітне (AFM) впорядкування мартенситної фази у сплавах на основі Ni-Mn-Ga-Cu. AFM-компонент виникає при температурах, нижчих за 100 К, співіснуючи з феромагнітним впорядкуванням до 4 К.

ВСТУП

Завдяки існуванню фази термопружного феромагнітного мартенситу сплави на основі Ni-Mn-Ga мають унікальний набір функціональних властивостей: магнітострикція, термічна, термомеханічна та магнітотермічна пам'ять форми, псевдопружність, магнітокалоричний ефект, особливі транспортні властивості тощо. Тому вони є перспективними багатофункціональними матеріалами [10, 23] для технічного застосування як актуатори, сенсори, перемикачі та ін.

Для створення нового перспективного класу багатофункціональних матеріалів для космічної техніки необхідні дослідження температурної стабільності та еволюції кристалічної структури, її кореляції з магнітною структурою.

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

В роботі досліджено монокристали сплавів Ni-Mn-Ga-(X) нестехіометричного складу, що мають модульовану (10M) та немодульовану (2M) тетрагональну кристалічну ґратку мартенситної фази. Полікристалічні зливки було виготовлено

з чистих (99.99 %) вихідних металів методом дугової плавки у захисній атмосфері аргону при підвищеному тиску для зменшення втрат марганцю через випаровування, та чотири рази переплавлено для підвищення хімічної гомогенності. Монокристали вирощено за методом охолодження у полі вертикального градієнта температур [17] із наступною термообробкою в захисній аргонній атмосфері для гомогенізації (72 год при $T = 1273$ К) та впорядкування L2₁-фази (48 год при $T = 1073$ К). Монокристалічні зразки для досліджень були вирізані алмазною пилою паралельно до площини {100} з наступним шліфуванням та електрополіруванням у спиртовому розчині 25 % HNO₃.

Для з'ясування та дослідження еволюції кристалічної структури монокристалів з температурою використовувались нейтронографічні методи та метод рентгенівського дифракційного аналізу. Температури фазових перетворень визначались методами дилатометрії та низькопольової магнітної сприйнятливості. Магніто механічні властивості досліджено за допомогою магнітодилатометричного комплексу високої роздільної здатності (100 нм) [1].

Нейтронографічні дослідження зразків проводились в Інституті Лауе-Ланжевена (ILL, Гренобль) та Берлінському центрі нейтронних досліджень (BENSC, Берлін). Для досліджень використовувались монокристалні дифрактометри D15, D10 (ILL) та E2 (BENSC). Дослідження температурної стабільності кристалічної структури зразків проводились *in-situ* у діапазоні температур від 4 до 350 К із використанням термостата «Orange syofurnace OF-2» та криостата замкненого циклу «Displex».

ДОСЛІДЖЕНІ МАТЕРІАЛИ ТА ПРИГОТУВАННЯ ЗРАЗКІВ

В табл. 1 подано хімічний склад, температури початку та кінця прямого та зворотного мартенситних перетворень (M_S , M_F , A_S , A_F) та точки Кюрі (T_C). На рис. 1 приведено отримані темпе-

ратурні залежності низькопольової магнітної сприйнятливості та дилатації, які використовувались для визначення температур прямого та зворотного мартенситних перетворень та температури Кюрі.

Кристалічну структуру мартенситної та аустенітної фаз було визначено методами порошкової та монокристалічної рентгено- та нейтронографії (рис. 2, 3 та табл. 2). Порошки було отримано розмеленням вирізаних частинок монокристалів вагою 0.2–0.4 г до розміру частинок 5–30 мкм, які потім відпалювались при температурі $T = 800$ °С для релаксації дефектів та залишкових напружень.

Надструктурна модуляція кристалічної ґратки мартенситної фази відбувається за системою $[101]\&[10-1]_{\text{ОЦТ}}$. У табл. 3 подано співвідношення реальної кристалічної ґратки мартенситу

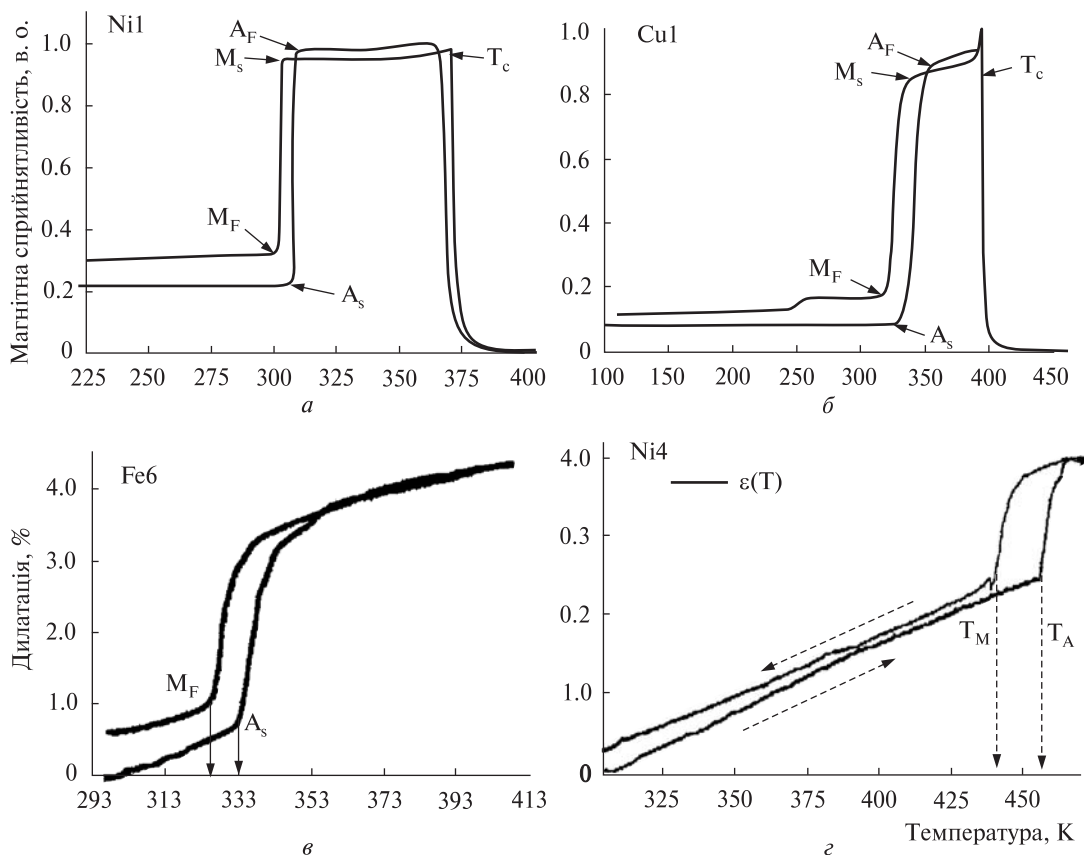


Рис. 1. Температурні залежності при фазових перетвореннях: *a*, *b* — магнітної сприйнятливості (монокристали сплавів Ni1, Cu1); *v*, *z* — дилатації (монокристали сплавів Fe6, Ni4)

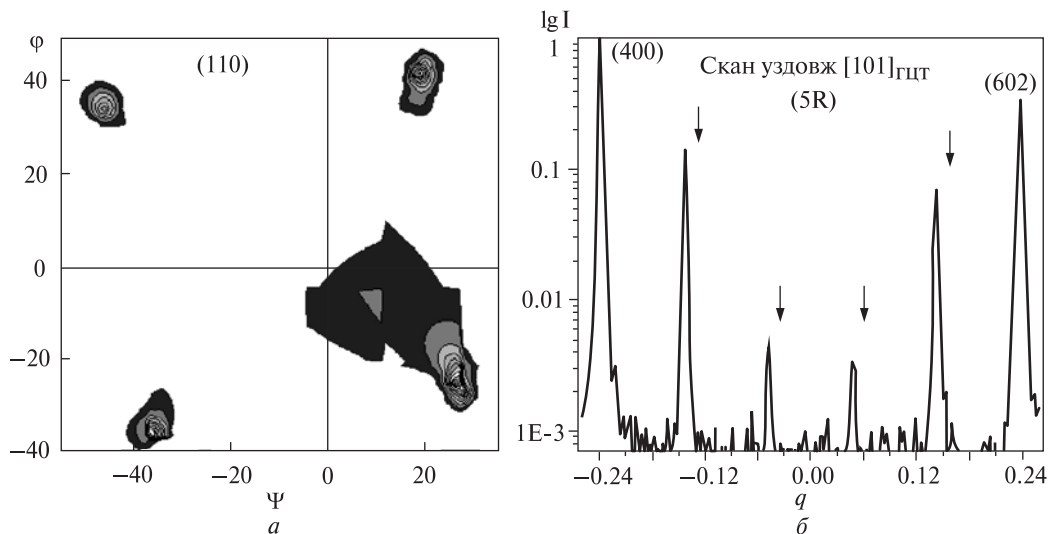


Рис. 2. Полосна рентгенодифракційна фігура (110) для кристалографічного орієнтування монокристалу Ni1 (а) та скан уздовж $q = [h0l]$ оберненого простору для визначення надструктурної модуляції мартенситу (б)

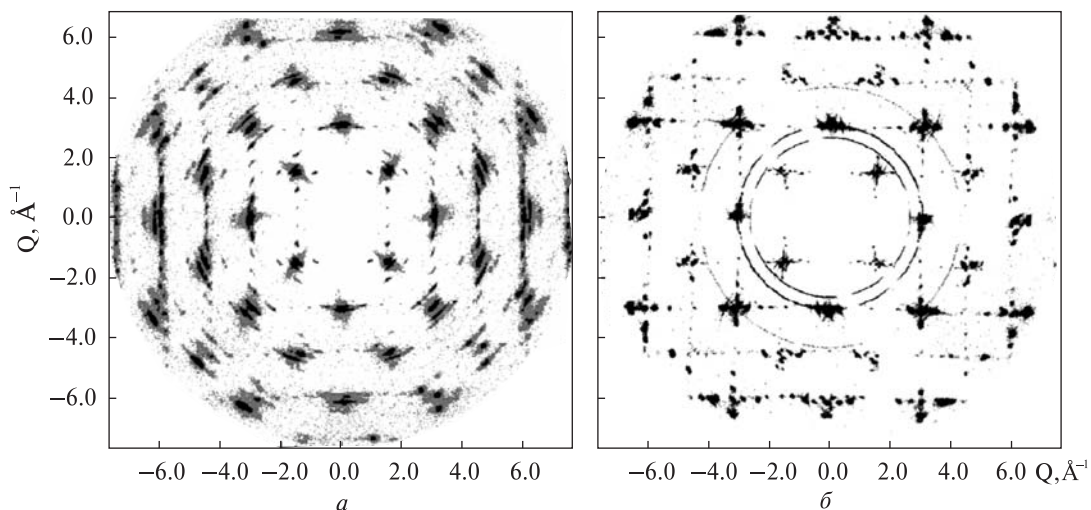


Рис. 3. Площини оберненого простору монокристалів Cu2 (а) та Fe6 (б) (довжина хвилі $\lambda = 1.21 \text{ \AA}$, дифрактометр E2, BENSC), вісь зони — $[0k0]_{\text{ГЦТ}}$, $T = 293 \text{ K}$

Таблиця 1. Хімічний склад та температури фазових перетворень

Сплав	Ni, at %	Mn, at %	Ga, at %	X	X, at %	M_S , K	M_F , K	A_S , K	A_F , K	T_C , K
Ni1	50.5	28.2	21.3	—	—	303	301	307	309	370
Ni2	49.6	28.4	22	—	—	306	304	310	313	372
Ni3	47.7	31.2	21.1	—	—	304	303	313	314	372
Ni4	53.3	19.1	27.6	—	—	450	440	456	465	360
Ni5	53.3	24.6	22.1	—	—	465	459	468	475	364
Fe2	49.4	27.5	21.3	Fe	1.8	316	312	327	332	386
Fe6	49.2	19.4	25.0	Fe	6.4	336	325	332	343	389
Cu1	49.4	23.3	25.6	Cu	1.7	339	317	326	353	393
Cu2	47.3	25.5	24.5	Cu	2.7	365	360	385	390	386

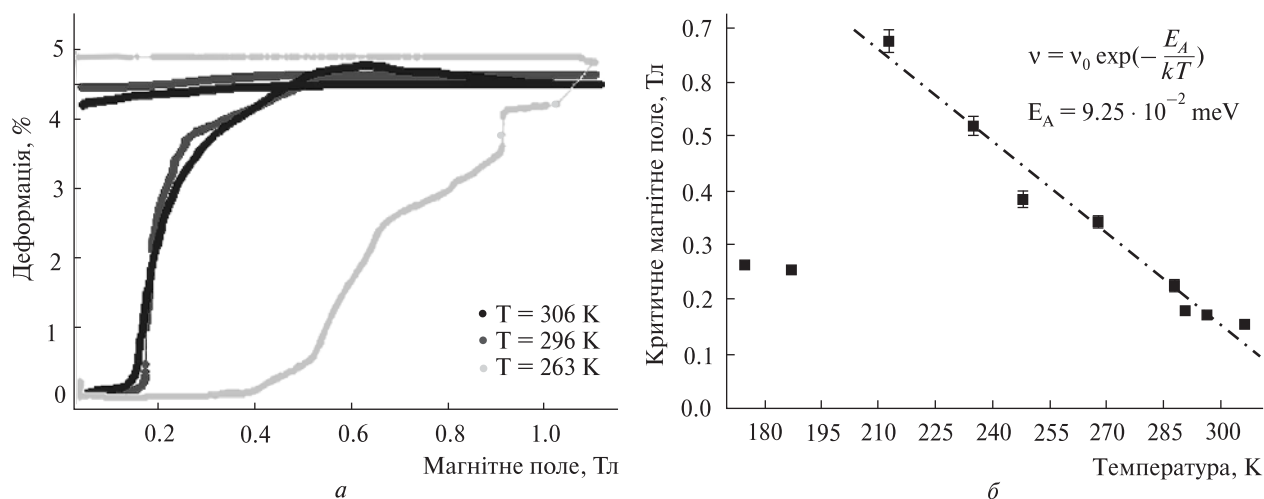


Рис. 4. Магнітоіндуковані деформації у мартенситній фазі монокристалічного зразка сплаву Ni1 при різних температурах (а) та температурна залежність критичного поля, необхідного для лавиноподібного руху двійникових границь мартенситу (б)

сплавів Ni-Mn-Ga та різних типів наближених ґраток, що використовуються у літературі.

ТЕМПЕРАТУРНА ЕВОЛЮЦІЯ МАРТЕНСИТНОЇ ФАЗИ МОНОКРИСТАЛІВ СПЛАВІВ NI-MN-GA

Магнітні та магнітомеханічні функціональні властивості монокристалів у мартенситній фазі мають сильну температурну залежність. Наприклад, як показано на рис. 4, охолодження впливає як на величину критичного магнітного поля, так і на максимальне значення досягнутих магнітопластичних деформацій у 5R-мартенситі. Величина критичного поля, необхідного для активації двійникових границь, має лінійну залежність від температури (рис. 4, б) в широкому температурному регіоні порядку 100 К від мартенситного перетворення до 200 К, що пояснюється зниженням рухливості двійникових границь з охолодженням через закріплення двійникуючих дислокацій дефектами. Проте при температурі $T \approx 200$ К ця залежність зникає, і в інтервалі від 200 до 160 К величина критичного поля різко зменшується до $H_{SW} = 0.26$ Тл при $T = 190$ К. Тобто, рухливість двійникових границь знову різко зростає, але при подальшому зниженні температури вона швидко знижується.

На рис. 5 показано перерозподіл нейтронних дифракційних піків у монокристалі Ni1 під дією

магнітного поля, що відображає перерозподіл мартенситних двійникових варіантів відповідно до напрямку прикладеного поля: при $T = 98$ К прикладене магнітне поле вже не впливає на

Таблиця 2. Кристалічна структура досліджених сплавів

Сплав	Елементарна комірка, група симетрії та параметри ґратки	
	Мартенсит (наближення)	Аустеніт, ГЦК $Fm-3m$
Ni1	(ОЦТ) $I4/mmm$, $a = 4.21 \text{ \AA}$, $c = 5.6 \text{ \AA}$	$a = 5.85 \text{ \AA}$
Ni2	(ОЦТ) $I4/mmm$, $a = 4.20 \text{ \AA}$, $c = 5.58 \text{ \AA}$	$a = 5.85 \text{ \AA}$
Ni3	(ОЦТ) $I4/mmm$, $a = 4.22 \text{ \AA}$, $c = 5.59 \text{ \AA}$	$a = 5.85 \text{ \AA}$
Ni4	ОЦТ, $I4/mmm$, $a = 3.82 \text{ \AA}$, $c = 6.66 \text{ \AA}$	$a = 5.85 \text{ \AA}$
Ni5	ОЦТ, $I4/mmm$, $a = 3.81 \text{ \AA}$, $c = 6.63 \text{ \AA}$	$a = 5.85 \text{ \AA}$
Fe2	(ОЦТ) $I4/mmm$, $a = 4.21 \text{ \AA}$, $c = 5.63 \text{ \AA}$	$a = 5.84 \text{ \AA}$
Fe6	$Immm$, $a = 6.25 \text{ \AA}$, $b = 5.85 \text{ \AA}$, $c = 5.61 \text{ \AA}$	$a = 5.85 \text{ \AA}$
Cu1	(ОЦТ) $I4/mmm$, $a = 4.20 \text{ \AA}$, $c = 5.48 \text{ \AA}$	$a = 5.91 \text{ \AA}$
Cu2	$Immm$, $a = 6.76 \text{ \AA}$, $b = 5.86 \text{ \AA}$, $c = 5.15 \text{ \AA}$	$a = 6.00 \text{ \AA}$

Таблиця 3. Співвідношення різних типів наближення кристалічної ґратки

Аустеніт	Мартенсит					
ГЦК	ГЦТ*	ОЦТ* ¹	5R	10M	7R	14M
[100]	[100]	[110]	[105]	[1 0 10]	[107]	[1 0 14]
[001]	[001]	[001]	[010]	[0 1 0]	[010]	[0 1 0]

* — наближення, ¹ — реальна структура сплавів з немодульованим ОЦТ мартенситом (Ni4, Ni5)

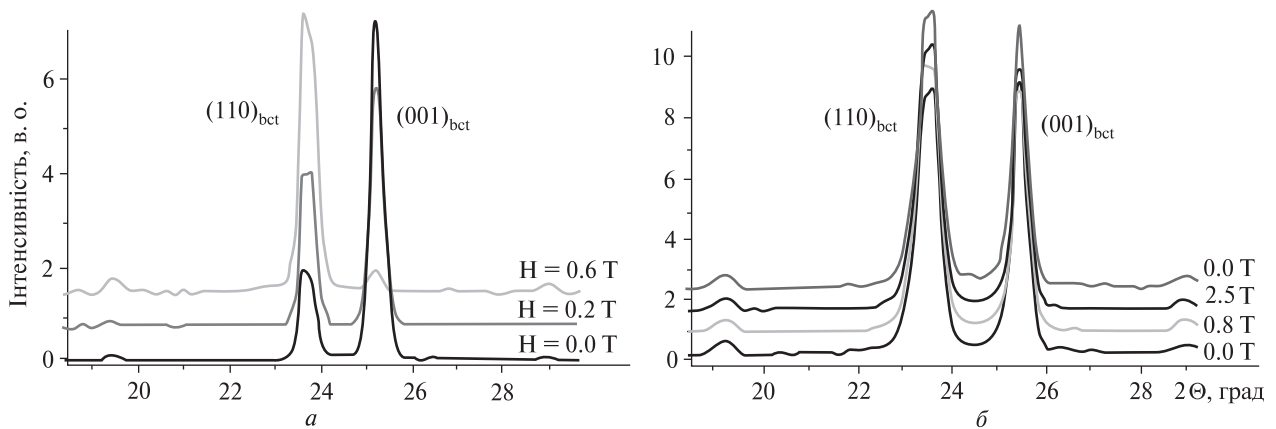


Рис. 5. Переорієнтація мартенситних двійникових варіантів у монокристалічному зразку сплаву Ni1 під дією магнітного поля: *a* — $T = 290$ К, магнітне поле вигідно орієнтоване до $(110)_{\text{ОЦТ}}$; *б* — $T = 98$ К, магнітне поле не спричиняє передвійникування мартенситу

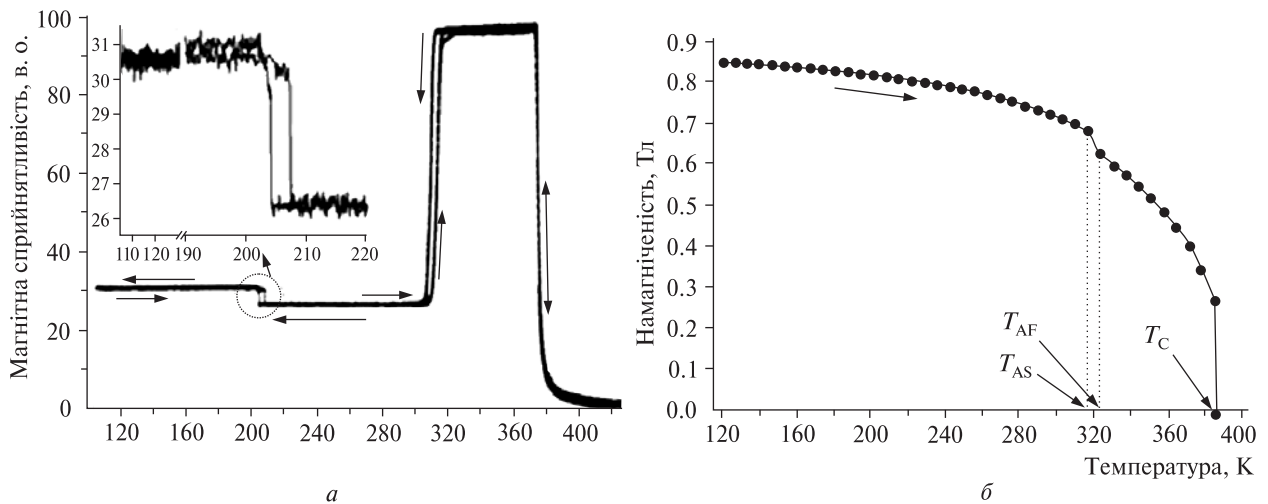


Рис. 6. Температурні залежності для монокристалу Ni1: *a* — низькопольової магнітної сприйнятливості, *б* — намагніченості насичення ($H = 1.5$ Тл)

двійниковий стан мартенситу, отже границі стають остаточно заблокованими.

Для визначення фізичного механізму цієї аномальної поведінки проведено серії експериментальних досліджень, що поєднали вимірювання температурної залежності низькопольової магнітної сприйнятливості та намагніченості насичення, приклад яких наведено на рис. 6 для монокристалу Ni1. Видно, що з охолодженням у феромагнітній мартенситній фазі монокристалу сплаву Ni1 відбувається певний «стрибок» магнітної сприйнятливості при $T = 204$ К, що

характеризується малим гістерезисом ($\delta T = 4$ К). Проте на температурній залежності намагніченості насичення (рис. 6, б) того ж монокристалу у полі $H = 1.5$ Тл жодних аномалій не спостерігається. Для визначення природи цього феномену проведено детальні дослідження кристалічної структури монокристалів сплавів та її температурної залежності в усьому інтервалі температур існування мартенситної фази.

Раптові зміни температурної залежності магнітної сприйнятливості зазвичай розглядаються як ознаки структурних фазових перетворень або

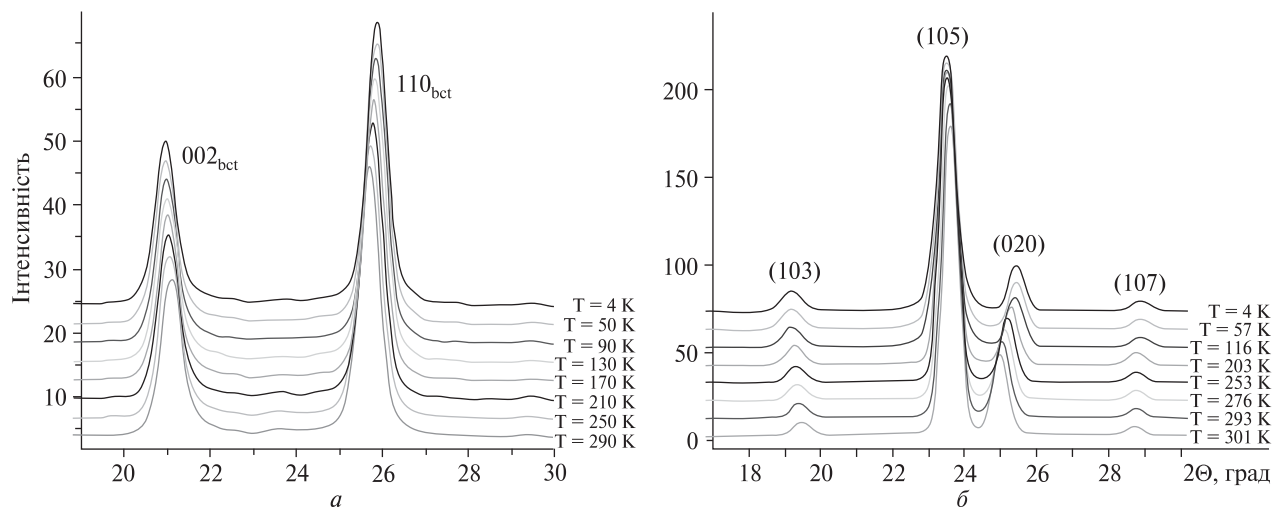


Рис. 7. Результати нейтронних термодифрактометричних досліджень кристалічної структури мартенситу при глибокому охолодженні у 2М- (а, монокристал Ni4) та 5R- (б, монокристал Ni1) типів мартенситу

магнітних переходів. Тому аномалії температурної залежності, аналогічні до представленої на рис. 6 при $T = 200$ К, зазвичай вважаються ознакою міжмартенситного перетворення. Проте, як правило, наявної інформації недостатньо для такого твердження, оскільки прямим доказом структурних змін є лише прямі нейтроно- або рентгенотермодифрактометричні дослідження у питомому температурному діапазоні. Метод дифракції нейтронів при високій глибині проникнення чутливий як до кристалічної (ядерної), так і магнітної структури, що дозволяє дослідити повний об'єм масивного монокристалічного зразка. Комбінація цих властивостей забезпечує істотну перевагу перед рентгенівською дифракцією, а особливо — перед ТЕМ, що надає інформацію лише для тонкоплівкового зразка. Структура тонкої плівки істотно відрізняється від структури масивного кристалу. Через високу магнітокристалічну анізотропію мартенситу, який завдяки поверхневому розмагніченню створює значні напруги у зразку, а також через сильно неоднорідне локальне нагрівання електронним пучком результати ТЕМ-досліджень зразка сильно спотворюються. Це робить неможливим їхнє порівняння з результатами рентгено- чи нейтронографічних досліджень. Крім того, у даному випадку результати ТЕМ-досліджень слід розглядати із значним застере-

женням. Аби отримати надійну інформацію про температурну еволюцію кристалічної та магнітної структури у масивному монокристалічному матеріалі, проведено серії нейтронографічних досліджень в Інституті Лауе-Ланжевена (ILL, дифрактометр D10, Франція) та Берлінському центрі нейтронних досліджень (BENSC, дифрактометр E2). Найбільш показові результати дифракційних досліджень наведено на рис. 7–9.

Отже, кристалічна 5R-ґратка мартенситу є стабільною в усьому температурному діапазоні існування мартенситної фази — до 4 К (рис. 7, 8). Однак, як впливає з рис. 8, в, дифузне розсіяння різко зростає в інтервалі 200–220 К при охолодженні, даючи початок дифузним хордам уздовж $[110]_{\text{ГЦТ}}$ стержнів надструктурних сателітів, як позначено чорними лініями.

Оскільки нейтрон має магнітний момент та спіні, за допомогою нейтронографії можна дослідити еволюцію магнітної структури мартенситу з температурою, застосовуючи спеціальну геометрію розсіяння. Інтегральна інтенсивність рефлексу пропорційна квадрату амплітуди розсіяння $\mathfrak{I} \approx F_{hkl}^2$, а у випадку неполяризованих нейтронів ядерне та магнітне розсіяння є фазово-незалежними: $F_{hkl}^2 = F_{hkl}^{2(nukl)} + F_{hkl}^{2(magn)}$, де $F_{hkl}^{magn} = \sum_{\nu} f_{\nu}^{magn} Q_{hkl,\nu} e^{[2\pi i(hx_{\nu} + ky_{\nu} + lz_{\nu})]}$ — амплітуда магнітного розсіяння (рис. 6), $Q_{hkl,\nu} = m_{\nu} -$

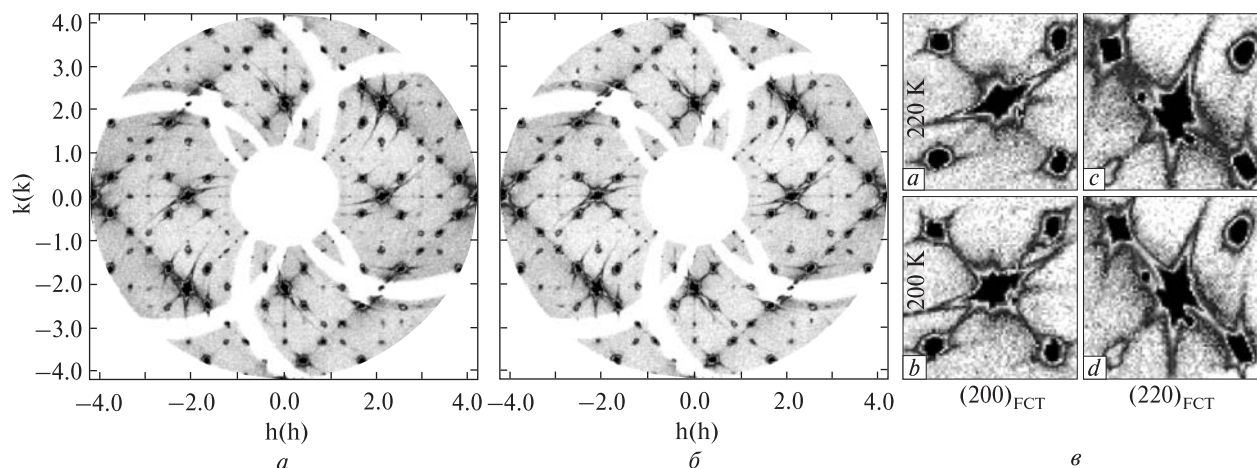


Рис. 8. Приклади нейтронних термодифрактометричних досліджень монокристалу Ni1 — (0k0) площина оберненого простору 5R-мартенситу при охолодженні від $T = 290$ К (а) до 4 К (б) та фрагменти (0k0) площини при $T = 220$ і 200 К навколо $(200)_{\text{ГЦТ}}$ і $(220)_{\text{ГЦТ}}$ рефлексів (в)

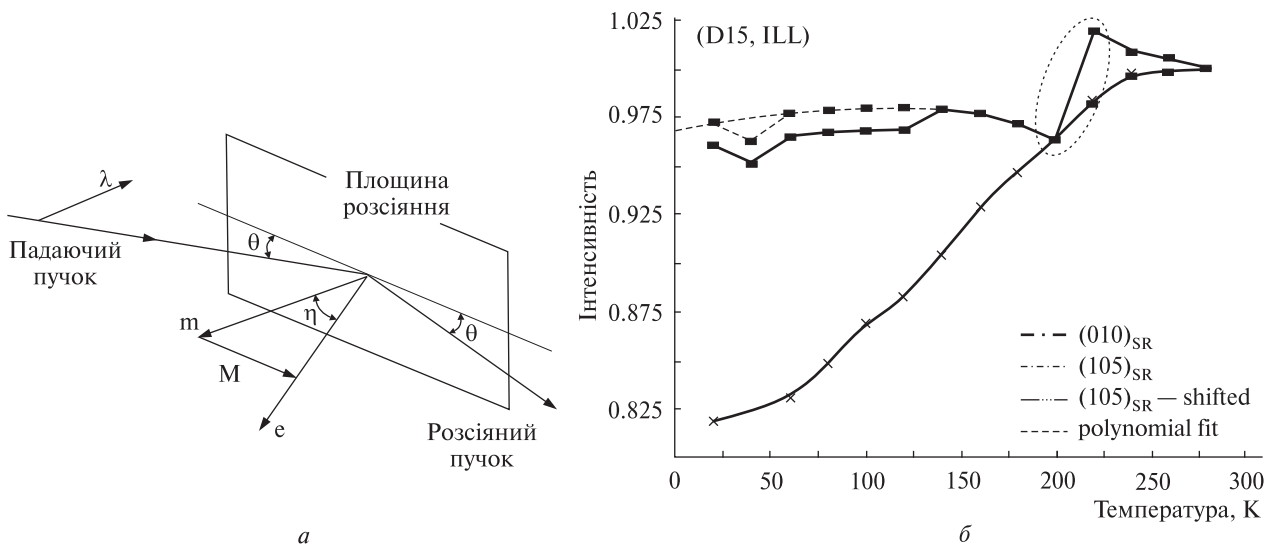


Рис. 9. Геометрія магнітного розсіяння (а) та порівняння температурної залежності інтегральної інтенсивності головних рефлексів (б): $(010)_{\text{SR}}$ — ядерного структурного, без магнітного внеску розсіювання, завдяки геометрії та $(105)_{\text{SR}}$ — з найсильнішим магнітним внеском розсіювання

— $(\mathbf{e}_{hkl} \mathbf{m}_v) \mathbf{e}_{hkl}$, та \mathbf{m}_v — магнітний момент окремого атома елементарної комірки, \mathbf{e}_{hkl} — одиничний вектор розсіяння, v — номер атома в комірниці, та hkl — індекси Міллера.

На рис. 9 показано температурну залежність інтегральної інтенсивності після еліптичного інтегрування, двох головних рефлексів з 800 досліджених (D15, ILL).

Важливим є факт, що із зниженням температури інтегральна інтенсивність рефлексів від

ядерного структурного компонента розсіяння нейтронів змінюється гладко в усьому інтервалі, однак на температурній залежності магнітного розсіяння нейтронів спостерігається різкий аномальний злам залежності біля $T = 200$ К (рис. 9). Порівняння температурної залежності інтегральної інтенсивності розсіяння магнітного та ядерного рефлексів доводить, що при збереженні кристалічної ґратки 5R-мартенситу при температурі 200 К відбуваються різкі зміни у

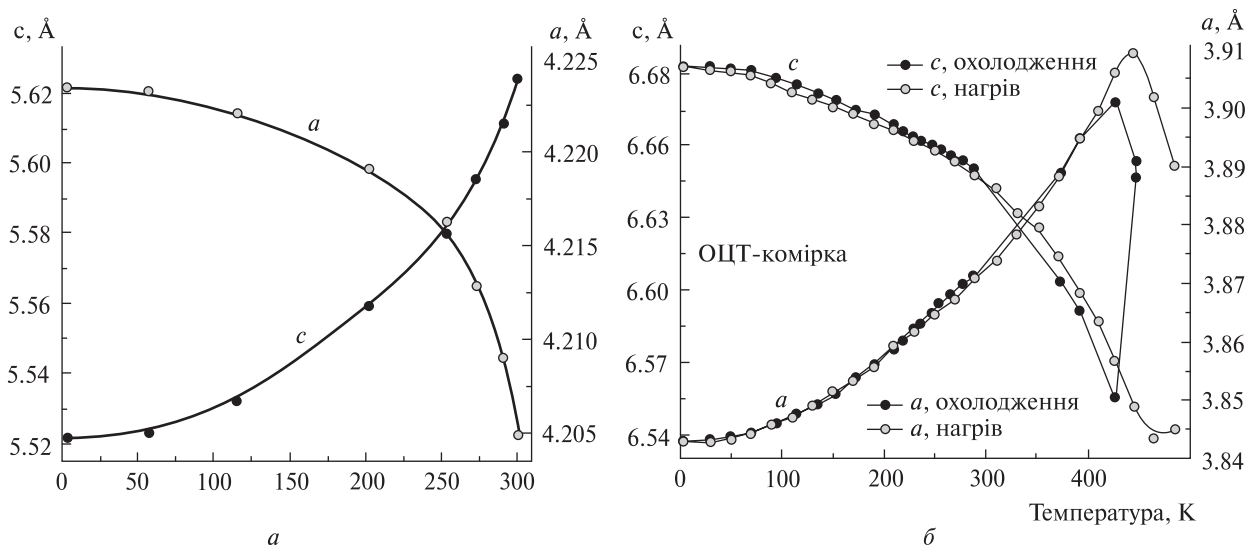


Рис. 10. Температурна еволюція параметрів кристалічної ґратки ОЦТ (*a*, монокристал Ni4) та 5R (*b*, монокристал Ni1) мартенситу

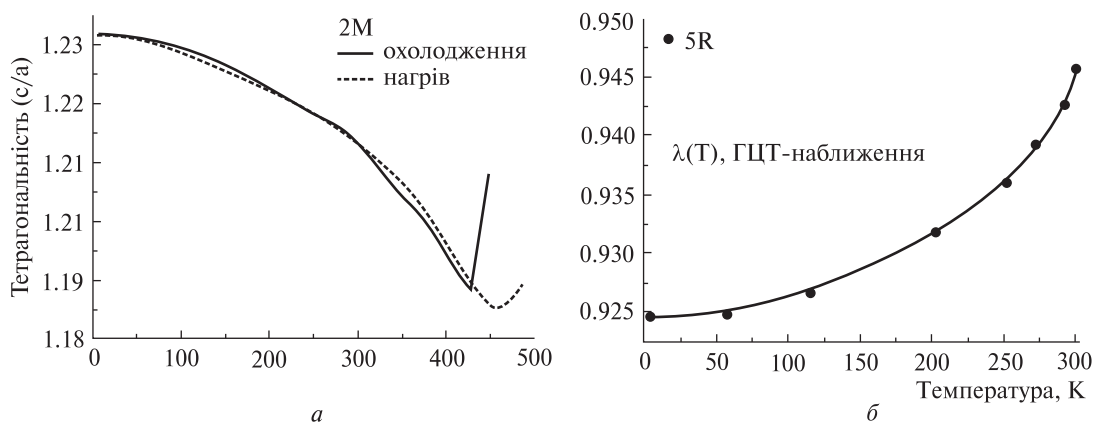


Рис. 11. Зміна тетрагонального викривлення кристалічної ґратки мартенситу: ОЦТ (*a*, монокристал Ni4) та 5R (*b*, монокристал Ni1)

магнітній структурі. На перший погляд це можна пояснити тим, що сильно анізотропна зміна параметрів кристалічної ґратки мартенситу з температурою (рис. 10) та тетрагональної дисторсії кристалічної ґратки (рис. 11) призводить до анізотропної зміни міжатомних відстаней та напрямку зв'язків, а отже, — обмінної взаємодії. Таким чином, деяка величина такої зміни (у даному випадку $T = 200$ K) стає критичною та призводить до перебудови електронної структури, а отже — й магнітної. А оскільки у сплаві носіями магнітного моменту є атоми Ni та Mn,

можна припустити, що такий магнітний перехід може відповідати перебудові магнітної структури з феромагнітної сумісної до $2q$ -феромагнітної, чи несумісної феромагнітної, залишаючи параметри кристалічної ґратки незмінними, але впливаючи на магнітні та транспортні властивості мартенситної фази. Однак в такому випадку це привело б до появи додаткових сателітних рефлексів на дифракційних картинах (рис. 7, 8) та температурної залежності намагніченості насичення (рис. 6), чого не спостерігається. Так само це не пояснювало б стабільності ОЦТ мар-

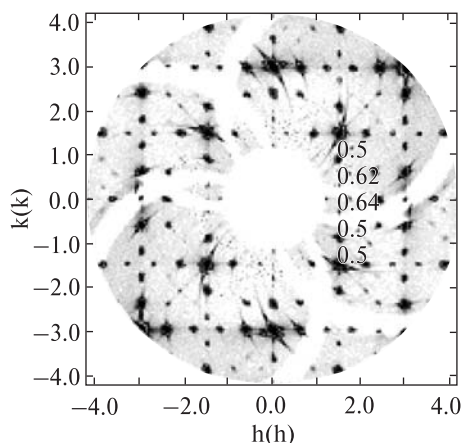


Рис. 12. Нейтронна дифракційна картина від монокрystalу Ni1 у площині (010) оберненого простору при $T = 293 \text{ K}$ ($\lambda = 1.21 \text{ \AA}$, E2, BENSC)

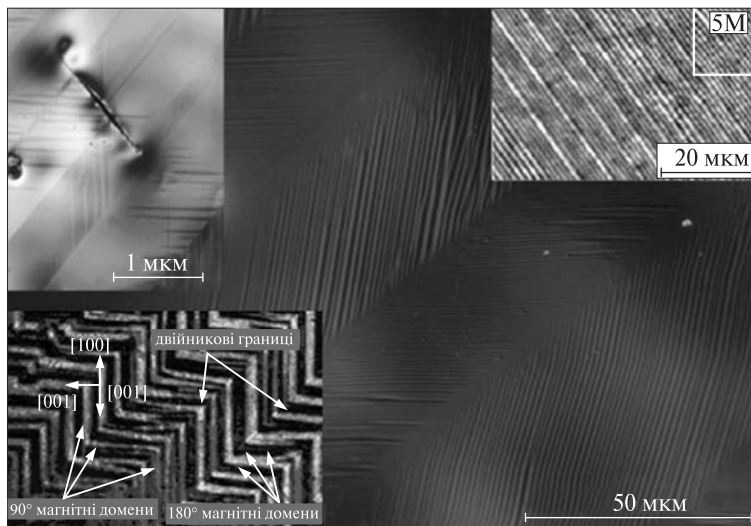


Рис. 13. Ієрархічна морфологія двійникування мартенситу на прикладі 5R-структури (монокристал сплаву Ni1) на макроскопічному (фонове зображення), мікроскопічному (зліва, зверху) та нанорівні (вгорі, справа [18]), та її відповідності до морфології магнітної доменної структури (внизу, зліва), дослідженої методом магнітооптичної мікроскопії за ефектом Фарадея-Кера

тєнситу. Також на температурній залежності параметрів кристалічної ґратки мартенситу (рис. 10) не спостєрїгається злам залежності, якого можна було б очїкувати при перебудовї магнітного впорядкування та змїні мїжатомної обмїнної взаємодїї. Отже, повинно бути інше пояснення описаного феномену.

Детальніше проаналїзуємо отриманї дифракційнї результати (рис. 12). Видно, що надструктурнї сателїти модульованого мартенситу є нееквідистантними та розташованї асиметрично мїж основними бреггївськими рефlekсами. У той же час спостєрїгається складна ієрархічна структура мартенситу, при якій двїйники виявляються на рїзних структурних рївнях (рис. 13).

Цей факт, разом з результатами дослідження морфологїї мартенситної фази, проведеного методами оптичної металогрфїї та ТЕМ (рис. 13), а також нещодавнїми результатами HRTEM-досліджень [17–19] показали ієрархічний характер двїйникування з нанодвїйниковою природою модульованої структури мартенситу у сплавах Ni-Mn-Ga.

Наявнїсть чїткої кореляцїї морфологїї магнітної доменної та двїйникової мїкроструктури

мартенситу завдяки сильнїй магнітокристалїчнїй анізотропїї призвело до ідеї пояснити описанї вище аномалїї температурної залежності магнітних та транспортних властивостей перебудовою мартенситу на рївнї мїкроструктури. Тобто, анізотропна еволюцїя параметрів кристалїчної ґратки мартенситу, а отже й тетрагонального чи орторомбїчного викривлення, призводить до накопичення напружень на двїйникових границях, що релаксують при досягненнї деякої критичної величини, призводячи до змїни морфологїї двїйникової, та магнітної доменної структури мартенситу, що й призводить до рїзкої змїни магнітних та транспортних властивостей. Таке пояснення узгоджується з усїма викладеними експериментальними фактами.

Отже, результати металогрфїї (рис. 14) та визначення низькопольової магнітної сприйнятливостї (рис. 15) пояснюють термїчні ефекти, описанї вище. На рис. 15 показано, що у початковому станї 5R-мартенсит є стабїльним в усьому температурному інтервалї, без жодних ознак термїчноїндукованих «мїжмартенситних перетворень». Однак магнітомеханїчне тренування мартенситного монокрystalу спричиняє накопичення за-

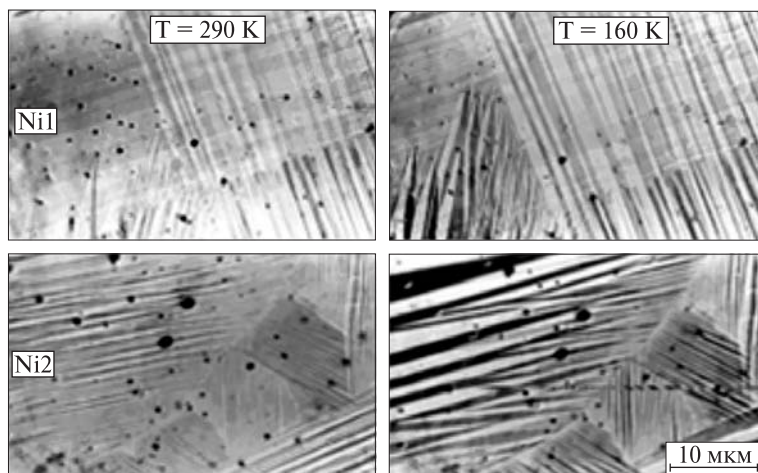


Рис. 14. Перебудова морфології двійникового мартенситу з температурою завдяки зміні стану ієрархічної мезомасштабної двійникової субструктури у монокристалах Ni1 та Ni2

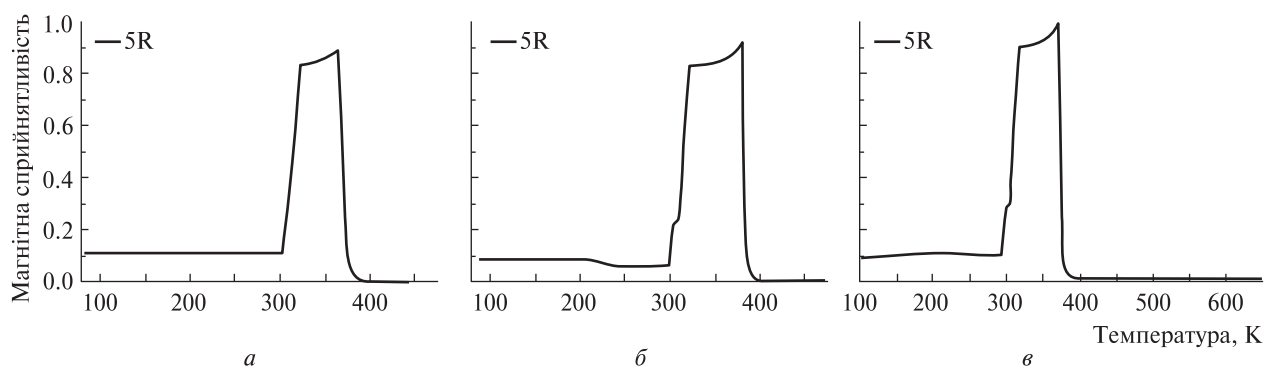


Рис. 15. Вплив магнітомеханічного тренування на стабільність 5R-мартенситу, досліджений методом низькопольової магнітної сприйнятливості: *a* — після відпалу, релаксований стан, *б* — після деформаційного циклування, *в* — після *in-situ* відпалу, релаксований стан

лишкових напружень у кристалі, що релаксують разом з термічними напруженнями, як описано вище, що й призводить до перебудови двійникової морфології мартенситу з температурою завдяки зміні стану ієрархічної мезомасштабної двійникової субструктури у монокристалах, як видно з рис. 14, та як результат — спостерігається на температурній залежності магнітних властивостей (рис. 15), проте такі залишкові напруження можуть бути прибрані навіть короткочасним відпалом кристалу.

Такі зміни транспортних чи магнітних властивостей часто хибно вважаються ознаками міжмартенситних перетворень, що жодного разу не було підтверджено результатами дифрактометричних досліджень.

Монокристали сплавів, легованих міддю та залізом (сплави Fe2, Fe6, Cu1 та Cu2), також показали високу стабільність мартенситної фази в усьому температурному інтервалі існування мартенситу. На рис.16 наведено приклад такого дослідження для сплаву Cu2.

Методом порошкової нейтронної термодифрактометрії доведено, що мартенситна фаза є стабільною в усьому інтервалі температур існування, без будь-яких ознак міжмартенситного перетворення. На температурній залежності внутрішнього тертя $Q(T)$ також є «аномалія» в інтервалі 250–200 К, що спостерігається як збільшення демпфування при охолодженні (рис. 14, праворуч, чорна крива) при відсутності магнітного поля. Ця аномалія знімається накла-

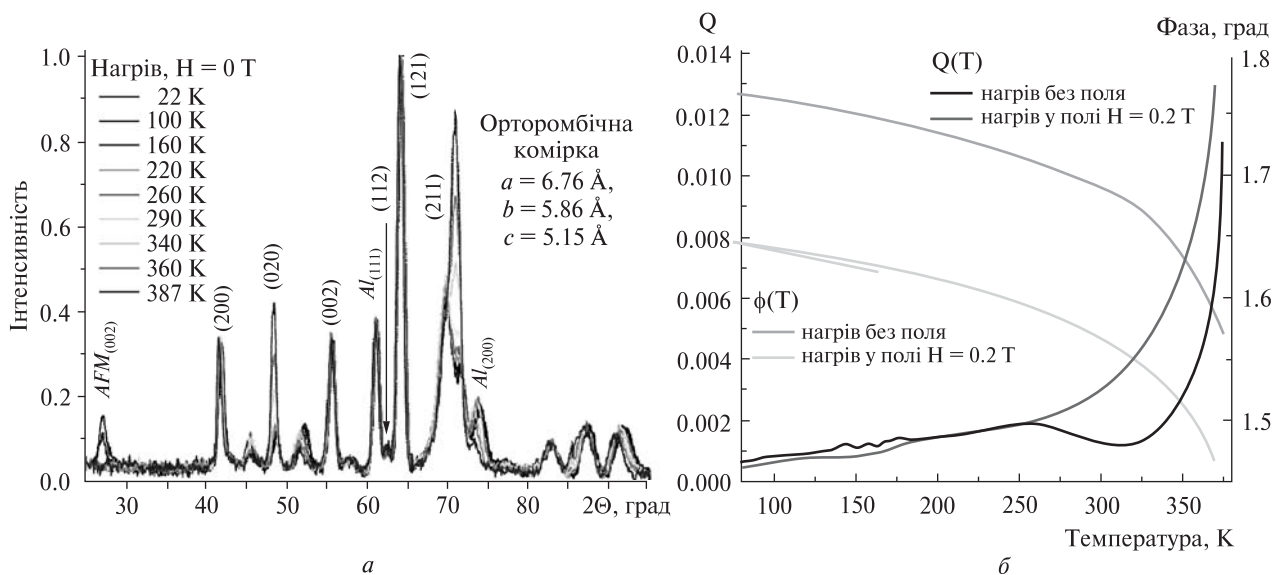


Рис. 16. Термічна стабільність мартенситної фази сплаву Cu_2 , легovanого міддю, досліджена методами нейтронної порошкової дифрактометрії (а) та внутрішнього тертя (б)

денням до зразка слабкого ($H = 0.2 \text{ Тл}$) коаксіального магнітного поля. Варто зазначити, що на температурній залежності кута (або комплексної складової) внутрішнього тертя жодних аномалій не спостерігається в обох випадках.

Вперше експериментально спостережено антиферромагнітне (AFM) впорядкування мартенситної фази у сплавах на основі Ni-Mn-Ga (рис. 14). AFM-впорядкування виникає при температурах, нижчих за 100 K, співіснуючи з феромагнітним впорядкуванням.

Отже, жодних ознак перебудови кристалічної ґратки внаслідок термічно індукованого «між-мартенситного перетворення», наприклад 5R-7R, про яке йдеться в роботах [2–6, 12–15, 21, 22, 24–28], не існує. Проте спостережені у роботах [2–6, 12–15, 21, 22, 24–28] процеси пояснюються перебудовою двійникової та магнітної доменної морфології мартенситу завдяки релаксації залишкових та термічних напружень, спричинених сильною анізотропною температурною залежністю параметрів кристалічної ґратки, що, відповідно, призводить до різкої зміни магнітних, магнітомеханічних та транспортних властивостей.

Цей процес пов'язаний із зниженням енергії дефектів пакування з охолодженням. Важливо,

що такі «політипові переходи» є надзвичайно чутливими до якості кристалів [20] та внутрішніх напружень, наявних у кожному кристалі внаслідок розподілу дефектів у кристалічній ґратці та акомодацийних напружень, завдяки чому результати стосовно таких «переходів» можуть бути неповторюваними, що досить часто спостерігається. З іншого боку, легування марганцем призводить до зниження енергії дефектів пакування у сплавах з пам'яттю форми [11, 16], що пояснює той факт, що у нестехіометричних сплавах на основі Ni-Mn-Ga з підвищеною концентрацією марганцю формується «модульований» тип кристалічної ґратки мартенситу, який є стабільним в усьому температурному інтервалі його існування.

ВИСНОВКИ

Показано, що кристалічна структура мартенситу є стабільною в усьому інтервалі температур його існування. Однак сильна анізотропна температурна зміна параметрів ґратки призводить у модульованому мартенситі до перебудови морфології двійникової та магнітної доменної структури мартенситу завдяки релаксації залишкових та термічних напружень та до різкої зміни маг-

нітних, магнітомеханічних та транспортних властивостей.

Вперше експериментально спостережено антиферомагнітне (AFM) впорядкування мартенситної фази у сплавах на основі Ni-Mn-Ga-Cu. AFM-компонент виникає при температурах, нижчих за 100 К, співіснуючи з феромагнітним впорядкуванням до 4К.

Роботу виконано у рамках проекту INTAS № 06-100024-9396 при спільному фінансуванні НКАУ і CNES.

1. Cherepin V. T., Glavatska N. I., Glavatskiy I. N., Gavriljuk V. G. Dilatometer for measurements of linear dimension variation under effect of temperature, magnetic field and mechanical stress // Meas. Sci. Tech. — 2002. — **13**. — P. 174–178.
2. Chernenko V. A., Amengual A., Cesari E., et al. Thermal and Magnetic Properties of Stress-Induced Martensites in Ni-Mn-Ga Alloys // J. Phys. C. — 1995. — 5/2. — P. 95–98.
3. Chernenko V. A., Cesari E., Khovailo V., et al. Intermartensitic phase transformations in Ni-Mn-Ga studied under magnetic field // J. Magn. Magn. Mater. — 2005. — **290–291**. — P. 871–873.
4. Chernenko V. A., Pons J., Cesari E., Ishikawa K. Stress-temperature phase diagram of a ferromagnetic Ni-Mn-Ga shape memory alloy // Acta Materialia. — 2005. — **53**. — P. 5071–5077.
5. Chernenko V. A., Segui C., Cesari E., et al. Sequence of martensitic transformations in Ni-Mn-Ga alloys // Phys. Rev. B. — 1998. — **57**, N 5. — P. 2659–2662.
6. Dai L., Cullen J., Wuttig M. Intermartensitic transformation in a NiMnGa alloy // J. Appl. Phys. — 2004. — **95**. — P. 6957–6959.
7. Glavatska N., Dobrinskiy A., Glavatskiy I., et al. Effect of alloying on transformation temperatures and magnetoplasticity in Ni-Mn-Ga alloys // Func. Mater. — 2006. — **13**, N 2. — P. 331–336.
8. Glavatskiy I., Glavatska N., Dobrinsky A., et al. Crystal structure and high-temperature magnetoplasticity in the new Ni-Mn-Ga-Cu magnetic shape memory alloys // Scr. Mater. — 2007. — **56**, N 7. — P. 565–568.
9. Glavatskiy I., Glavatska N., Söderberg O., et al. Transformation temperatures and magnetoplasticity of the Ni-Mn-Ga alloyed with Si, In, Co or Fe // Scr. Mater. — 2006. — **54**. — P. 1891–1895.
10. Glavatskiy I., Glavatska N., Söderberg O., Rudenko O. Time-dependent effects caused by the magnetic field in the Ni-Mn-Ga magnetic shape memory martensites // Novel Structural and Functional Materials and Methods for their characterization: Зб. тез конф. — Київ: ФООП Купріянова, 2007. — P. 72–94.
11. Jun J.-H., Choi C.-S. Variation of stacking fault energy with austenite grain size and its effect on the MS temperature of $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation in Fe-Mn alloy // Mater. Sci. Engng. A. — 1998. — **257**. — P. 353–356.
12. Khovailo V. V., Oikawa K., Wedel C., et al. Influence of intermartensitic transitions on transport properties of Ni_{2.16}Mn_{0.84}Ga alloy // J. Phys.: Condens. Matter. — 2004. — **16**. — P. 1951–1954.
13. Kokorin V. V., Konoplyuk S. M., Perekos A. E., Semanova Yu. S. Martensitic transformation temperature hysteresis narrowing and magnetocaloric effect in ferromagnetic shape memory alloys Ni-Mn-Ga // J. Magn. Magn. Mater. — 2009. — **321**, N 7. — P. 782–785.
14. Kokorin V. V., Martynov V. V., Chernenko V. A. Stress-induced martensitic transformations in Ni₂MnGa // Scr. Metall. Mater. — 1992. — **26**. — P. 175–177.
15. Kokorin V. V., Perekos A. O., Tshcherba A. A., et al. Intermartensitic phase transitions in Ni-Mn-Ga alloy, magnetic field effect // J. Magn. Magn. Mater. — 2006. — **302**. — P. 34–39.
16. Lahiri A. K., Banerjee T. Stacking fault densities of copper-manganese alloys // Brit. J. Appl. Phys. — 1965. — **16**. — P. 1217.
17. Mecklenburg A., Fiechter S., Nabein H.-P., Schneider R. P. Verfahren und Anordnung zur Kristallzuchtung aus metallischen Schmelzen oder Schmelzlösungen // Pat. N DE102004018664A1 (2005).
17. Pat. N DE102004018664A1. Verfahren und Anordnung zur Kristallzüchtung aus metallischen Schmelzen oder Schmelzlösungen / A. Mecklenburg, S. Fiechter, H.-P. Nabein, R. P. Schneider. — Publ. 2005.
18. Mogylnyy G., Glavatskiy I., Glavatska N., et al. Crystal structure and twinning in martensite of Ni_{1.96}Mn_{1.18}Ga_{0.86} magnetic shape memory alloy // Scripta Mater. — 2003. — **48**. — P. 1427–1432.
19. Pons J., Chernenko V. A., Santamarta R., Cesari E. Crystal structure of martensitic phases in Ni-Mn-Ga shape memory alloys // Acta Mater. — 2000. — **48**. — P. 3027–3038.
20. Rolfs K., Mecklenburg A., Guldbakke J.-M., et al. Crystal quality boosts responsiveness of magnetic shape memory single crystals // J. Magn. Magn. Mater. — 2009. — **321**, N 8. — P. 1063–1067.
21. Segui C., Chernenko V. A., Pons J., Cesari E. Low-temperature-induced intermartensitic phase transformations in Ni-Mn-Ga single crystal // J. Magn. Magn. Mater. — 2005. — **290–291**. — P. 811–815.
22. Segui C., Chernenko V. A., Pons J., et al. Low temperature-induced intermartensitic phase transformations in

- Ni-Mn-Ga single crystal // *Acta Materialia*. — 2005. — **53**. — P. 111–120.
23. *Söderberg O., Aaltio I., GeY., et al.* Ni-Mn-Ga multifunctional compounds // *Mat. Sci. Eng. A*. — 2008. — **481–482**. — P. 80–85.
24. *Söderberg O., Sozinov A., Lanska N., et al.* Effect of intermartensitic reaction on the co-occurrence of the magnetic and structural transition in Ni-Mn-Ga alloys // *Mater. Sci. Engng. A*. — 2006. — **438–440**. — P. 957–960.
25. *Soolshenko V., Lanska N., Ullakko K.* Structure and twinning stress of martensites in non-stoichiometric Ni₂MnGa single crystal // *J. Phys. IV France*. — 2003. — **112**. — P. 947.
26. *Sozinov A., Likhachev A. A., Lanska N., Ullakko K.* Giant magnetic-field-induced strain in NiMnGa seven-layered martensitic phase // *Appl. Phys. Lett.* — 2002. — **80**, N 10. — P. 1746–1748.
27. *Srivastava V. K., Chatterjee R., Nigam A. K., O'Handley R. C.* Electric and magnetic signatures of martensitic and intermartensitic transformations in Ni-Mn-Ga crystal // *Solid State Communs.* — 2005. — **136**. — P. 297–299.
28. *Straka L., Heczko O., Lanska N.* Magnetic properties of various martensitic phases in Ni-Mn-Ga alloy // *IEEE Trans. Magn.* — 2002. — **38**. — P. 2835.

Надійшла до редакції 20.02.09

I. M. Glavatsky, N. I. Glavatska

TEMPERATURE EVOLUTION OF MARTENSITIC STRUCTURE IN Ni-Mn-Ga SINGLE CRYSTALS

We studied the temperature stability and evolution of crystal and magnetic structures in Ni-Mn-Ga-X (X = Cu, Fe) single crystals of non-stoichiometric composition with the modulated 10M and not modulated tetragonal 2M lattices of the martensitic phase. The correlation between structure changes and functional properties was investigated. The following methods were implemented: X-ray diffraction, neutronography, dilatometry, low-field magnetic susceptibility and measurements of a magneto-mechanical properties using magneto-dilatometric complex of a high resolution (100 nm). It is clarified that the crystal structure of the studied martensites is stable over the whole temperature range of their existence. The deep cooling (down to 4 K) leads to a strongly anisotropic change of the lattice parameters, which causes the restructuring of the twin and domain martensitic structures due to the relaxation of retained and thermal stresses. It is this fact that leads to a sharp change in the magnetic, magneto-mechanical and transport properties during cooling down to about 200 K. The antiferromagnetic (AFM) ordering of the martensitic phase in the Ni-Mn-Ga-Cu-based alloys is observed for the first time. The AFM component appears below 100 K and coexists with the ferromagnetic ordering down to 4 K.

УДК 536.27:536.42:621.396.6

А. Г. Косторнов, А. А. Шаповал, А. Л. Мороз, Г. А. Фролов, И. В. Шаповал

Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича Национальной академии наук Украины, Київ

ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ С КАПИЛЛЯРНЫМИ СТРУКТУРАМИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО И АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Представлено результати розробки теплових труб, які є елементами теплообмінних систем космічного та авіаційного призначення. Запропоновано і застосовано нові типи капілярних структур — основних елементів теплових труб. Досліджено теплофізичні характеристики розроблених труб з композиційними капілярними структурами: останні мають ряд технічних переваг у порівнянні з традиційними конструкціями, зокрема, при роботі теплових труб проти напрямку дії гравітаційних сил

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы развития теории и практики создания тепловых труб (ТТ), являющихся эффективными теплопередающими устройствами современных систем охлаждения и термостабилизации космических и авиационных приборов и аппаратов, остаются актуальными. Пристальный интерес к тепловым трубам [2–4, 12] возник в начале 70-х годов XX века и был вызван необходимостью преодолеть технические сложности эвакуации избыточной теплоты в условиях работы космических аппаратов. Теплофизические возможности относительно простых и надёжных систем воздушного охлаждения оказались исчерпанными; системы жидкостного охлаждения на борту летательных аппаратов часто не удовлетворяли требованиям высокой надёжности. Тепловые трубы оказались способными не только обеспечивать эффективный отвод тепла из труднодоступных теплонапряжённых зон оборудования, но и заполнили, в определённой степени, известную разницу между коэффициентами теплоотдачи α , типичную при переходе от воздушного охлаждения к жидкостному.

В развитии теории физических процессов двухфазного теплообмена в тепловых трубах

космического назначения есть некоторые особенности, обусловленные, в частности, условиями микрогравитации. До настоящего времени влияние микрогравитации на механизмы кипения и конденсации не только для условий работы ТТ, но и для прочих условий исследовано недостаточно. Имеющиеся немногочисленные данные свидетельствуют о том, что интенсивность теплообмена при кипении в условиях микрогравитации, например жидкого азота, существенно (до 40 %) уменьшается по сравнению с наземными условиями [1]. Возникает необходимость исследований влияния микрогравитации на теплофизические параметры ТТ при их функционировании в космических условиях.

Для успешного применения отечественных тепловых труб в космических аппаратах необходимы совершенные капиллярные структуры (КС), в значительной степени определяющие эффективность ТТ. Работы по созданию таких КС ведутся в Институте проблем материаловедения (ИПМ) им. И. Н. Францевича НАН Украины с 1972 г. [5, 6].

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ ИЗВЕСТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным назначением тепловых труб является передача (отвод) тепловых потоков $Q_{\text{ТТ}}$ при малых значениях термических сопротивлений

© А. Г. КОСТОРНОВ, А. А. ШАПОВАЛ, А. Л. МОРОЗ,
Г. А. ФРОЛОВ, И. В. ШАПОВАЛ, 2009

труб $R_{ТТ}$. Известно, что для эффективного функционирования ТТ важнейшее значение имеет конструкция капиллярной структуры. Капиллярная структура ТТ должна выполнять две основных функции: 1) гидродинамическую (транспорт рабочей жидкости-теплоносителя при различной ориентации ТТ в гравитационном поле); 2) теплофизическую (высокая интенсивность теплообмена в зонах нагрева и охлаждения ТТ). Как и во многих теплофизических приложениях, одновременное влияние гидродинамических и теплофизических факторов на суммарный процесс обычно носит противоположный характер, т. е. улучшение гидродинамики процессов приводит к ухудшению их теплофизики.

Известно, что в первых конструкциях ТТ в качестве капиллярной структуры использовались слои металлических сеток [2, 4, 8, 10, 13]. Обоснованием такого применения была доступность сетчатых материалов, так как они серийно производятся промышленностью. Однако сетчатые материалы, как показал опыт их использования в тепловых трубах, имеют неудовлетворительные теплофизические и эксплуатационные характеристики. В частности, характерное для сетчатых материалов распределение пор по размерам приводит к срыву устойчивости процессов двухфазного теплообмена (кипения) в зонах нагрева ТТ, а также накладывает существенные ограничения на величины отводимых ТТ тепловых потоков. Кроме того, сетчатые материалы при изготовлении ТТ обычно укладываются в несколько слоёв, что приводит к образованию локальных и относительно больших термических сопротивлений R теплоотдачи, в том числе контактных термических сопротивлений.

Лучшие результаты, по сравнению с сетчатыми КС, обеспечивают металлические порошковые капиллярные структуры (МПКС) [9, 11]. В отличие от сетчатых ТТ, МПКС обладают распределением пор по размерам, обеспечивающим устойчивое кипение в зоне нагрева. Также порошковые КС обеспечивают относительно большие значения высоты капиллярного поднятия в ТТ рабочих жидкостей-теплоносителей. Однако и МПКС имеют некоторые недостатки.

К таковым, в частности, относятся: 1) наличие относительно большого количества закрытых (тупиковых) пор; 2) ухудшение проницаемости КС из-за повышенного гидравлического сопротивления, обусловленного особенностями строения металлических порошковых структур; 3) наличие так называемого «теплового гистерезиса», возникающего при периодическом увеличении и уменьшении значений подводимых к ТТ тепловых потоков [11]. Тепловой гистерезис ухудшает работу ТТ.

Металлические волокновые капиллярные структуры (МВКС), разработанные и исследованные в ИПМ НАН Украины, практически лишены отмеченных выше недостатков. Благодаря особенностям строения в МВКС нет тупиковых пор, что исключает нежелательный тепловой гистерезис. Металлические волокновые капиллярные структуры обеспечивают высокие гидродинамические характеристики (хорошую проницаемость, относительно большую высоту капиллярного поднятия рабочей жидкости), высокие теплофизические характеристики (возможность функционирования ТТ в режимах устойчивого кипения рабочих жидкостей в зонах нагрева, высокую интенсивность теплообмена за счёт кипения, высокие предельные значения (по теплоотводу) критических тепловых потоков). МВКС обладают хорошими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Технология изготовления МВКС обеспечивает стабильные и воспроизводимые параметры, большой ресурс работы, высокую надёжность функционирования, возможность пластической деформации при конструктивной необходимости. Последнее отличие ТТ с МВКС является важным фактором для практического использования ТТ в реальных системах и конструктивах современной аппаратуры.

Основные характеристики разработанных в ИПМ НАН Украины ТТ и МВКС следующие:

- материалы МВКС — медь, коррозионно-стойкие стали, углеродистая сталь, нихром;
- материалы корпусов ТТ — медь, коррозионно-стойкая сталь;
- пористость МВКС — 10...97 %;
- толщина МВКС — 0.2...10 мм;

- длина МВКС — до 4 м;
- диаметр исходных металлических волокон — 20...80 мкм;
- длина волокон — 2...10 мм;
- средний (эффективный) диаметр пор — 10...250 мкм;
- максимальный диаметр пор — 20...500 мкм.

Основными направлениями исследований ИПМ НАН Украины в области разработок тепловых труб и капиллярно-пористых структур для ТТ являются:

- исследования параметров порового пространства новых типов капиллярных структур, получаемых на основе волоконных и композиционных материалов;
- исследования гидродинамических характеристик слоистых и каркасных градиентных капиллярных структур;
- исследования теплофизических характеристик капиллярных структур различных типов, получаемых из волокон и композиций на их основе;
- исследования теплофизических процессов на границе между металлическими поверхностями и нанесёнными на них капиллярными структурами новых типов.

К таким исследованиям относятся: изучение процессов кипения на поверхностях с пористыми покрытиями в зависимости от их структурно-гидродинамических характеристик; исследование влияния этих характеристик на контактное термическое сопротивление границ раздела между пористым и сплошным слоями; исследование теплообмена при конденсации жидкостей на пористых поверхностях.

В настоящее время в ИПМ НАН Украины осуществляются работы по исследованию влияния микрогравитации на параметры и характеристики тепловых труб, предназначенных для использования в системах космической техники. Проведенные комплексные исследования и разработки позволили создать композиционные волоконно-порошковые капиллярные структуры, в которых эффективно сочетаются положительные качества и свойства капиллярных структур, выполненных из монопорошковых и моноволоконных материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР И ТЕПЛОВЫХ ТРУБ НА ИХ ОСНОВЕ

В традиционных пористых материалах (сетчатых, порошковых, волоконных) имеет место жёсткая корреляция зависимости практически всех свойств от пористости Θ . Сочетание в одном материале структурных элементов с разными геометрическими размерами, и следовательно, разной плотностью упаковки, позволяет устранить такую зависимость. Нами используются новые композиционные слоистые материалы, содержащие как линейные (волокна) так и точечные (порошок) структурные элементы. В таких материалах реализуются различные механизмы уплотнения: контактный характер уплотнения порошков при облегчённом перемещении частиц путём взаимного скольжения и гибко-жёсткий характер уплотнения волокон, когда имеет место не только контактная, но и обратимая упругая и необратимая пластическая деформация. В зависимости от соотношения размеров порошковых и волоконных частиц, толщин волоконных и порошковых слоёв, диапазон изменения структурных характеристик таких материалов существенно расширяется.

Исследован процесс гравитационного формирования высокопористых композиционных материалов из металлических порошков и волокон. Листовые образцы материалов получали послойным осаждением при наложении вибрации волокон коррозионностойкой стали диаметром 30...100 мкм и порошка той же стали с размером частиц 0.04...0.3 мм.

Исследования свойств композиционных пористых материалов показали, что в зависимости от соотношения размеров порошковых ($d_{\text{п}}$) и волоконных ($d_{\text{в}}$) частиц, а также толщин волоконных и порошковых слоёв, формируются различные типы макроструктуры материалов. Структуры из отдельных волоконных и порошковых слоёв формируются при соотношении $d_{\text{п}}/d_{\text{в}} > 2$ (рис. 1). При значениях $d_{\text{п}}/d_{\text{в}} < 2$ порошок частично или полностью осаждается в предварительно сформированный высокопористый волоконный каркас (рис. 2, 3).

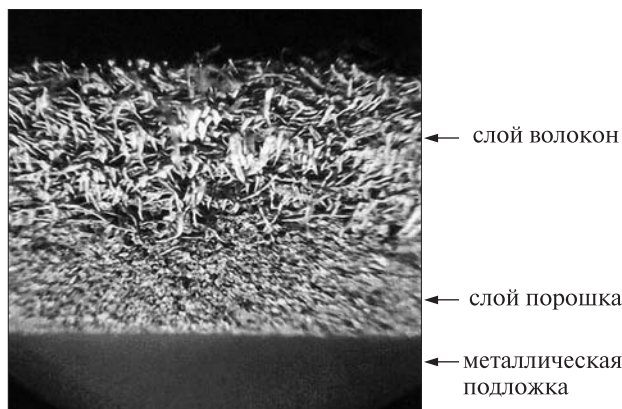


Рис. 1. Пористая слоистая волокнуно-порошковая композиция



Рис. 2. Строение волокнуной капиллярной структуры

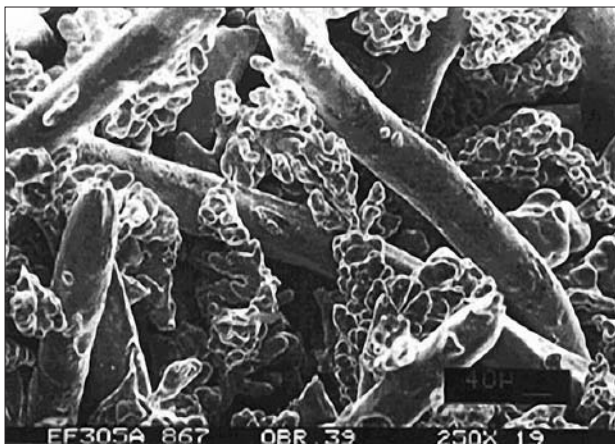


Рис. 3. Топограмма пористой каркасной волокнуно-порошковой композиции

Предварительно выполненные исследования показали, что наиболее перспективными для использования в ТТ являются материалы, выполненные в виде высокопроницаемого и прочного волокнуного каркаса. Он содержит один или несколько тонких волокнуно-порошковых слоёв, обеспечивающих интенсификацию как теплопереноса, так и массопереноса. В процессе разработки новых капиллярных структур были исследованы три типа слоистых КС: 1) волокнуные КС, содержащие слой из волокну диаметром 50 мкм, толщиной 0.75 мм и слой из волокну диаметром 30 мкм, толщиной 0.25 мм; 2) волокнуно-порошковые КС в виде каркасов из волокну диаметром 50 мкм и толщиной 1 мм, заполненных на глубину 0.25 мм порошком с размером частиц 60 мкм; 3) волокнуно-порошковые КС, представляющие собой волокнуные каркасы из волокну диаметром 30 мкм и толщиной 1 мм, заполненные на глубину 0.25 мм порошком с размером частиц 40 мкм.

Деформационные изменения в исследованных образцах КС удовлетворительно согласовывались с известными представлениями о механизмах уплотнения волокну и порошков [7]. Образцы из волокну, претерпевающих при уплотнении не только контактную, но и пластическую изгибную деформацию, значительно превосходили по деформационной способности порошковые образцы, отличающиеся контактным характером уплотнения.

В волокнуно-порошковых образцах имеют место оба вышеуказанных механизма уплотнения. В зависимости от размеров исходных волокну и порошков и соотношения толщин волокнуных и порошковых слоёв их деформационные кривые могут смещаться как в сторону волокнуных, так и в сторону порошковых материалов.

Характеристики опытной партии КС представлены в табл. 1.

Результаты исследований гидродинамических и структурных характеристик опытных образцов КС (рис. 4) свидетельствуют о том, что композиционные материалы несколько уступают моноволокнуным КС по проницаемости, однако при этом они обладают порами меньшего

размера (примерно в два раза). С уменьшением диаметра волокон размеры пор в моноволоконных материалах уменьшаются, но не достигают значений, которыми обладают композиционные материалы.

С учётом того фактора, что максимальный капиллярный напор в КС определяется величиной среднего гидравлического диаметра пор $D_{гр}$, перспективы применения разработанных композиционных материалов в тепловых трубах очевидны. Преимущества должны эффективно проявляться в экстремальных условиях работы ТТ, когда силы капиллярного давления и гравитации направлены противоположно друг другу. Дополнительным основанием для такого утверждения являются данные экспериментов, представленные на рис. 5: интегральная и дифференциальная кривые распределения пор в материале, образованном слоем волокон диаметром 30 мкм с максимальным и средним размером пор 100 и 45 мкм, а также слоем порошка дисперсностью 40 мкм с максимальным и средним размером пор 9 мкм и 2 мкм соответственно. Градиент размеров пор по толщине указанного материала, полученный по соотношению средних размеров пор, равен 22, а по соотношению максимальных размеров пор — 10.

Ограничение теплопередающей способности из-за транспортных свойств является одним из основных в работе низкотемпературных тепловых труб. Транспортные свойства КС, определяемые проницаемостью, средним размером пор и распределением пор в материале, оценивают в конечном итоге по скорости течения и предель-

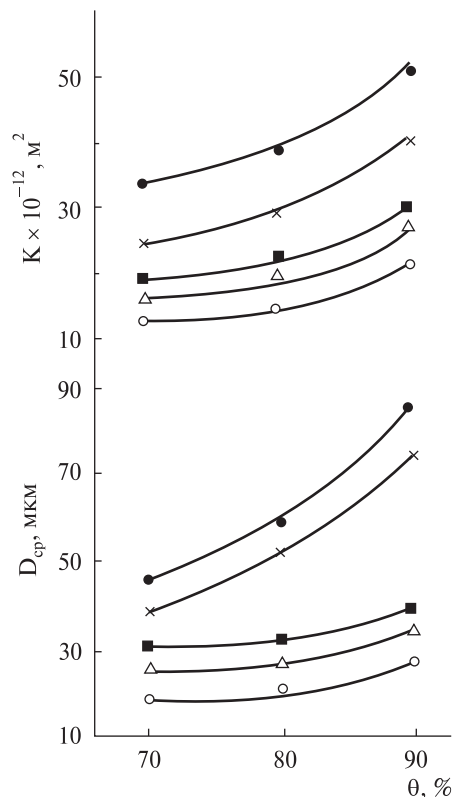


Рис. 4. Зависимость коэффициента проницаемости и среднего размера пор исследованных образцов КС от пористости $\Theta_{КС}$: ● — волокно \varnothing 50 мкм, × — волокно \varnothing 30 мкм, ■ — волокно \varnothing 50 мкм и порошок дисперсностью 30 мкм, Δ — волокно \varnothing 50 мкм и порошок дисперсностью 80 мкм, ○ — волокно \varnothing 30 мкм и порошок дисперсностью 40 мкм

ной высоте подъёма теплоносителя. На скорость и высоту подъёма влияет также краевой угол смачивания, зависящий лишь от поверх-

Таблица 1. Характеристики опытных образцов КС из металлических волокон и порошков

Номер образца	Масса, г	Толщина мм	Ширина мм	Длина мм	Средняя пористость, %	Состав материала
1	35	1.0	50	300	70.2	Слой волокон \varnothing 50 мкм, толщиной 0.75 мм и слой волокон \varnothing 30 мкм, толщиной 0.25 мм
2	24	1.0	50	300	80.4	
3	10	1.0	50	300	91.5	
4	36	1.0	50	300	69.3	Слой волокон \varnothing 50 мкм, толщиной 1.0 мм, заполненный на глубину 0.25 мм порошком 60 мкм
5	28	1.0	50	300	76.2	
6	20	1.0	50	300	82.0	
7	34	1.1	50	300	70.0	Слой волокон \varnothing 50 мкм, толщиной 1.0 мм, заполненный на глубину 0.25 мм порошком 40 мкм
8	28	1.0	50	300	76.0	
9	20	1.0	50	300	82.0	

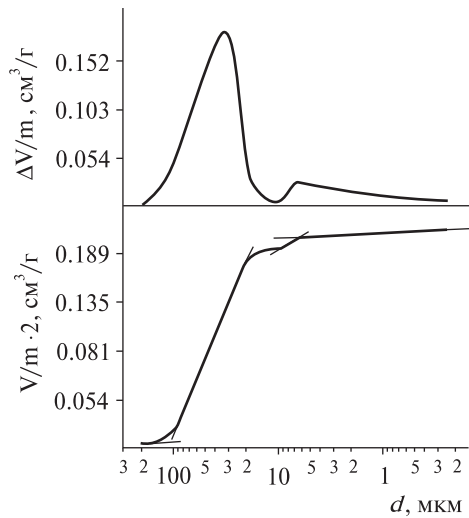


Рис. 5. Дифференциальная и интегральная кривые распределения пор в материале, образованном слоем из волокон \varnothing 30 мкм, толщиной 1.5 мм и слоем порошка дисперсностью 40 мкм, толщиной 0.5 мм

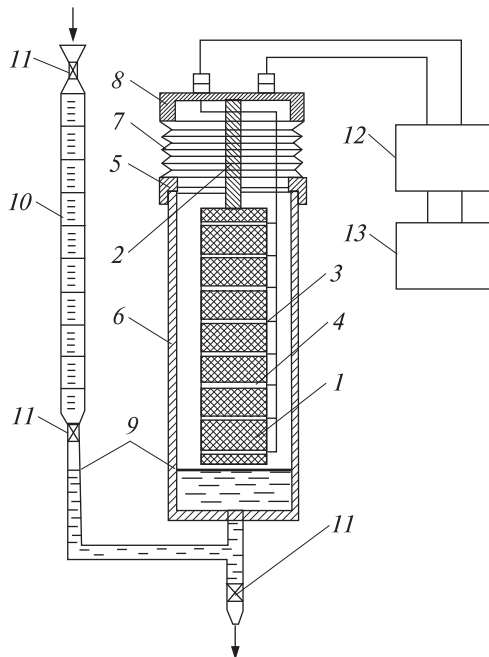


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для исследования влияния структурных характеристик материала на высоту и скорость капиллярного поднятия жидкостей: 1 — образец КС, 2 — направляющий стержень, 3 — зажимы, 4 — датчики, 5 — прокладка, 6 — камера, 7 — сильфон, 8 — крышка, 9 — уровень жидкости, 10 — бюретка, 11 — вентиль, 12 — сигнализатор уровня, 13 — цифровой вольтметр

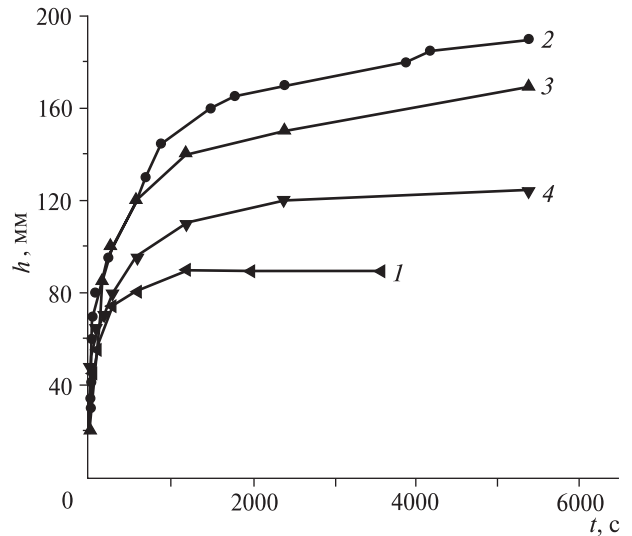


Рис. 7. Зависимости высоты капиллярного поднятия этанола в пористых материалах из волокон и порошков нержавеющей стали от времени: 1 — слой волокон \varnothing 30 мкм, пористость 82 %, 2 — композиции (волоконно \varnothing 50 мкм, порошок дисперсностью 80 мкм) с пористостью 67.5 %; 3 — композиции (волоконно \varnothing 30 мкм, порошок дисперсностью 40 мкм) с пористостью 65 %; 4 — композиции (волоконно \varnothing 50 мкм, порошок дисперсностью 80 мкм) с пористостью 85.6 %

ностных явлений на границе раздела «материал КС — теплоноситель».

Кинетику капиллярного транспорта изучали на установке, конструкция которой представлена на рис. 6. Образец исследуемой КС в виде ленты с помощью направляющего стержня устанавливали вертикально в рабочей камере. Полоски сухого гигроскопичного материала прижимали к поверхности пористого образца зажимами, последовательно подключенными к многоканальному сигнализатору уровня и цифровому вольтметру. Рабочая камера с подсветкой позволяла визуально следить за перемещением фронта жидкости-теплоносителя при давлении, создаваемом насыщенным паром жидкости. Через мерную бюретку рабочая камера установки заполнялась жидкостью до определённого уровня. Для контакта с жидкостью образец КС опускался вниз с помощью сильфона. При подъёме жидкости под действием капиллярных сил поочерёдно в каждом из датчиков происходило замыкание электрической цепи,

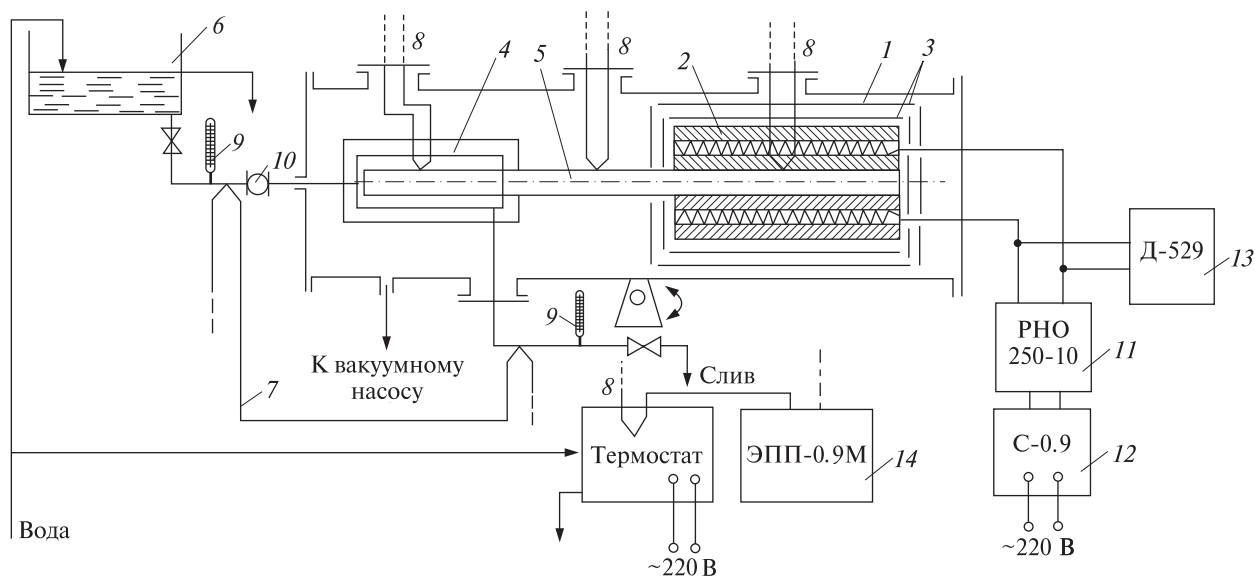


Рис. 8. Схема экспериментальной установки для испытаний тепловых труб и исследований их теплофизических характеристик: 1 — теплозащитная оболочка, 2 — электронагреватель, 3 — защитные экраны, 4 — кожух водяного охлаждения, 5 — тепловая труба, 6 — бак со стабильным уровнем воды, 7, 8 — термопары, 9 — ртутный термометр, 10 — расходомер (счётчик воды), 11 — регулятор напряжения электрического тока, 12 — стабилизатор напряжения, 13 — ваттметр

что фиксировалось посредством сигнализатора уровня и цифрового милливольтметра.

Данные исследований кинетики капиллярного впитывания разработанными композиционными материалами этанола представлены на рис. 7.

Волокново-порошковые композиции характеризуются высокой капиллярно-транспортной способностью и превосходят пористые однослойные моноволоконные материалы по высоте подъёма этанола в 1.5–2 раза при работе против сил гравитации. При этом композиции из волокон диаметром 50 мкм и порошка дисперсностью 80 мкм с лучшим сочетанием характеристик проницаемости и размеров пор обладают предельной высотой подъёма этанола. Каркасные волокново-порошковые композиции дополнительно обладают и другими положительными свойствами: они не только превосходят по высоте и скорости капиллярного подъёма жидкости (этанола) моноволоконные материалы, но и могут содержать один или несколько высокопроницаемых моноволоконных слоёв, обеспечивающих эффективный транспорт теплоносителя; один или несколько тонких волокново-порошковых слоёв с малым размером пор,

ответственных за величину капиллярного напора и интенсивность тепло- и массопереноса.

Для исследований теплофизических параметров ТТ разработаны специальные стенды (рис. 8, 9), в которых угол наклона ТТ относительно горизонта изменялся на 180°. Тепловая труба нагревалась специальным нагревателем: отвод тепла от зоны конденсации осуществлялся воздуш-



Рис. 9. Общий вид стенда для исследований тепловых труб

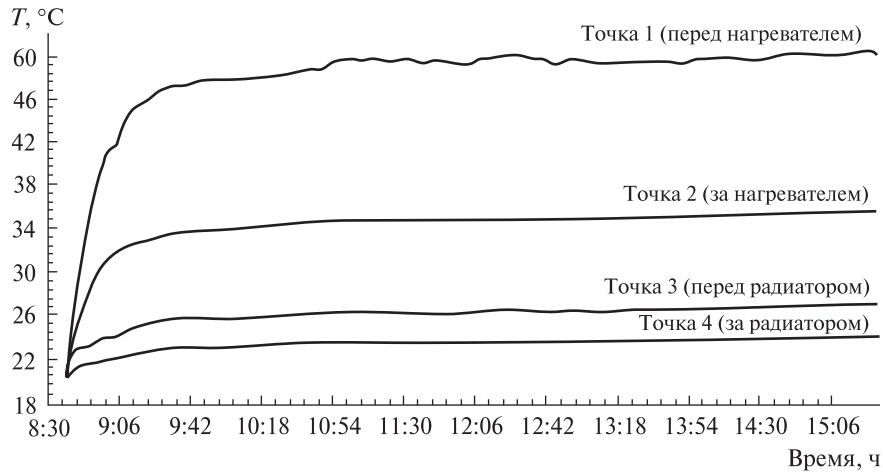


Рис. 10. Зависимость температуры корпуса опытной тепловой трубы от времени испытаний

ным или жидкостным охлаждением. Температуры по длине ТТ измеряли стандартными микро-термопарами.

В состав экспериментального стенда для исследований теплофизических характеристик тепловых труб входят: система подвода, регулирования и измерения мощности теплового потока; система высокоточного измерения температуры в контрольных точках ТТ; система обеспечения и измерения параметров теплоотвода; некоторые вспомогательные системы.

Методика исследований характеристик тепловых труб заключалась в следующем:

1) подготовка ТТ к испытаниям, установка термопар на поверхности трубы в 5–7 контрольных точках, с последующим креплением устройств теплоподвода и теплоотвода;

2) установка ТТ в рабочее положение («А» — нагрев ТТ «снизу»; «В» — ТТ расположена горизонтально; «С» — нагрев ТТ «сверху»);

3) подвод к ТТ тепла включением электронагревателя; при этом подводимый тепловой поток Q изменялся в диапазоне 0–70 Вт посредством лабораторного автотрансформатора с шагом 10 Вт. При установке ТТ в положении «С» тепловой поток изменялся в диапазоне 0–25 Вт с шагом $\Delta Q = 5$ Вт;

4) после достижения тепловой трубой стационарного теплового режима при определённом значении подводимого теплового потока, что

фиксировалось по показаниям термопар, производились измерения: подводимой мощности Q и температуры поверхности ТТ в 5–7 точках;

5) по экспериментальным данным определялись значения термических сопротивлений $R_{ТТ}$ исследуемых тепловых труб.

Для большей точности получаемых результатов количество и характеристики опытных тепловых труб были продублированы, т. е. изготовлено парное количество ТТ с максимально близкими определяющими характеристиками. Полученные экспериментальные результаты усреднялись для каждой пары ТТ; таким образом, погрешность результатов была уменьшена примерно в 1.5 раза.

Результаты проведения экспериментов представлены в виде графических зависимостей температуры в контрольной точке транспортной зоны на поверхности корпуса каждой исследованной тепловой трубы от времени испытаний τ и в виде зависимости термических сопротивлений $R_{ТТ}$ от подводимой мощности при изменении угла наклона ТТ относительно горизонта.

Типичная зависимость температуры распределения температуры поверхности ТТ от времени её функционирования представлена на рис. 10.

Зависимости термических сопротивлений $R_{ТТ}$ от подводимой мощности при изменении угла наклона ТТ относительно горизонта представлены на рис. 11, 12. Характеристики КС, ис-

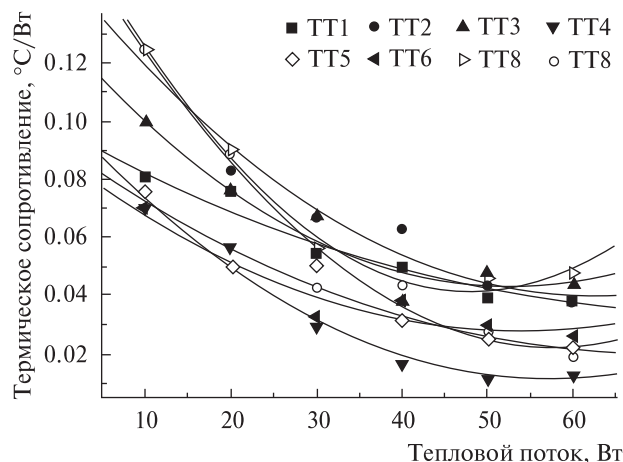


Рис. 11. Зависимость термических сопротивлений тепловых труб с композиционными капиллярными структурами от подводимого теплового потока при работе ТТ в режиме термосифона (нагрев ТТ — снизу)

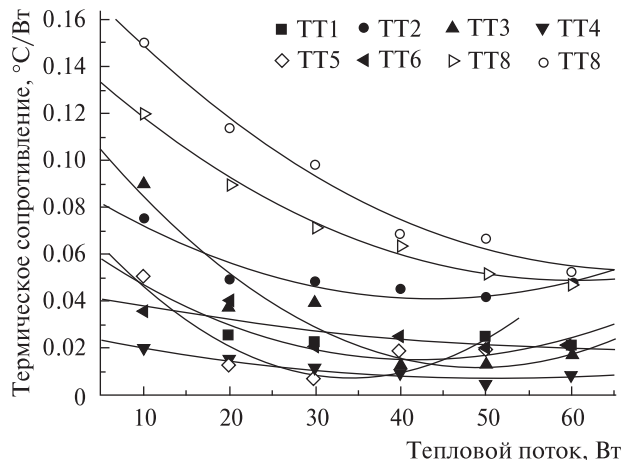


Рис. 12. Зависимость термических сопротивлений тепловых труб с композиционными капиллярными структурами от подводимого теплового потока при работе ТТ в горизонтальном положении

пользованных в опытной партии ТТ, представлены в табл. 2.

Экспериментальное определение максимальных тепловых потоков, передаваемых разработанными ТТ, не являлось целью настоящих исследований. Для оценки предельных тепловых потоков Q_{\max} нами использованы известные зависимости [2–4]. Результаты расчётов подтвердили тот факт, что высокопористые структуры обеспечивают большие максимальные тепловые потоки при положениях, близких к горизонтальному. Структуры со средней пористостью ($\Theta \cong 40\%$), по сравнению с высокопористыми КС, лучше работают в положении «нагрев ТТ — сверху». Необходимо отметить, что расчёты по известным формулам выполнены с учётом допущений о полном насыщении жидкостью капиллярной структуры ТТ. В реальных условиях функционирования ТТ с высокопористыми КС может иметь место частичное осушение КС (в случае расположения зоны нагрева ТТ выше зоны её охлаждения).

Известно, что скорость протекания жидкости через капиллярные структуры характеризуется вязкостным коэффициентом проницаемости K . Волокновые структуры отличаются от КС других типов, например порошковых, отсутствием тупиковых пор, препятствующих продольному

движению жидкости. В результате коэффициенты проницаемости для волокновых высокопористых КС ($\Theta > 70\%$) достигают значений $K = 80\text{--}100\text{ м}^2$, что значительно больше, чем для порошковых КС ($K = 5\text{--}30\text{ м}^2$). Таким образом, в горизонтальном положении волокновые КС значительно быстрее транспортируют жидкость к зоне нагрева по сравнению с порошковыми и сетчатыми КС. При работе против сил гравитации (в положении «нагрев ТТ — сверху») волокновые КС предельно высокой пористости не всегда могут обеспечить большие значения высоты капиллярного поднятия жидкости H , так как в таких структурах содержатся крупные поры. Соединение положительных свойств двух

Таблица 2. Характеристики КС, использованных в опытной партии ТТ

Номер ТТ	Состав КС	Пористость КС, %	Толщина КС, мм
ТТ 1	волокно \varnothing 50 мкм, поро-	71	1
ТТ 2	шок 80 мкм	74	1
ТТ 3	волокно \varnothing 30 мкм, поро-	79	1
ТТ 4	шок 40 мкм	78	1
ТТ 5	волокно \varnothing 50 мкм, поро-	85	0.8
ТТ 6	шок 80 мкм	85	0.8
ТТ 7	волокно \varnothing 30 мкм, поро-	83	0.8
ТТ 8	шок 40 мкм	85	0.8
ТТ 9	волокно \varnothing 80 мкм	89	0.8

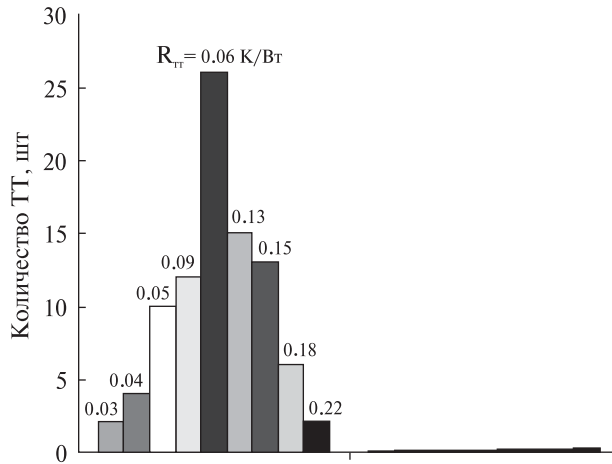


Рис. 13. Разброс значений термических сопротивлений тепловых труб для партии 90 шт. с одинаковыми характеристиками капиллярных структур

разных типов капиллярных структур в одной композиционной структуре способно обеспечить высокие характеристики созданных тепловых труб как при работе в горизонтальном положении ТТ, так и против гравитационных сил.

Результаты исследований подтвердили это утверждение. В положениях «А» (угол наклона $\varphi = -90^\circ$, нагрев ТТ «снизу») и «В» ($\varphi = 0^\circ$, горизонтальное положение ТТ) тепловые трубы с композиционными КС работали устойчиво, обеспечивая уровень температур транспортной зоны в диапазоне, аналогичном диапазону температур ТТ 9 с моноволоконной КС.

В положении «С» (угол наклона $\varphi = +90^\circ$, нагрев ТТ «сверху») ТТ 2 и ТТ 3 обеспечивали более высокие значения отводимого теплового потока ($Q_{\max} = 20$ Вт) по сравнению со значением $Q_{\max} = 10$ Вт для ТТ 9. Последний факт объясняется наличием в композиционной структуре порошковой составляющей (части КС), которая, обладая существенно меньшими по величине порами, обеспечивала лучший капиллярный подъем жидкости в зону нагрева ТТ.

Аналогичные результаты получены на остальных исследованных ТТ с композиционными КС (рис. 11, 12).

Результаты исследований разработанных ТТ с капиллярными структурами новых типов свидетельствуют о следующем.

1. В горизонтальном положении и в положении «нагрев ТТ — внизу» тепловые трубы в диапазоне передаваемых тепловых потоков $Q = 0-70$ Вт функционируют устойчиво, обеспечивая низкие значения термических сопротивлений R_{tt} и высокие теплофизические характеристики, которые не уступали характеристикам ТТ с моноволоконными структурами.

2. В положении «нагрев ТТ — сверху» тепловые трубы в диапазоне передаваемых тепловых потоков $Q = 0-20$ Вт также работают устойчиво и обеспечивают удовлетворительные значения термических сопротивлений R_{tt} .

Результаты исследований влияния характеристик разработанных ТТ с композиционными КС на величины термических сопротивлений R_{tt} показали, что с увеличением теплового потока Q термическое сопротивление разработанных ТТ несколько уменьшалось, что объясняется увеличением интенсивности теплообмена в зонах теплоподвода и охлаждения.

Относительно термических сопротивлений тепловых труб R_{tt} необходимо отметить следующее. Разработанная в ИПМ НАН Украины технология создания тепловых труб отдельными партиями по 50–100 шт. позволяет получать ТТ с близкими по величине характеристиками. Однако есть небольшие отклонения характеристик R_{tt} от средних значений для одной партии труб (рис. 13).

ВЫВОДЫ

1. Разработаны и исследованы тепловые трубы с композиционными капиллярными структурами нового типа, обеспечивающие высокие теплофизические и эксплуатационные характеристики.

2. Созданные тепловые трубы способны эффективно функционировать в любых положениях при нахождении в гравитационном поле.

Работа выполнена при совместной финансовой поддержке Фондов INTAS и Национального космического агентства Украины по проекту № 06-1000024-9339 «Development and creation of Heat Pipes on a Basis Metal-Fibrous Capillary Structures with Improved Thermophysic Characteristics for Temperature control Systems of the Perspective Space Vehicles».

1. Веркин Б. И., Кириченко Ю. А., Русанов К. В. Теплообмен при кипении в полях массовых сил различной интенсивности. — Киев: Наук. думка, 1988. — 255 с.
2. Воронин В. Г., Ревакин А. В., Сасин В. Я., Тарасов В. С. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1976. — 200 с.
3. Дан П., Рей Д. Тепловые трубы. — М.: Энергия, 1979. — 272 с.
4. Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Ягодкин И. В. Физические основы тепловых труб. — М.: Атомиздат, 1978. — 256 с.
5. Косторнов А. Г. Проницаемые металлические волокновые материалы. — Киев: Техника, 1983. — 128 с.
6. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 2002. — Т. 2. — 550 с.
7. Косторнов А. Г., Подрезов Ю. Н., Безьянный Ю. Г. и др. Пористые слоистые и каркасные волокнуно-порошковые композиции из нержавеющей стали // Порошковая металлургия. — 2006. — № 1/2. — С. 45–50.
8. Присняков В. Ф., Луценко В. И., Наврузов Ю. В. и др. Процессы переноса тепла и массы в тепловых трубах. — Киев: Наук. думка, 1992. — 160 с.
9. Смирнов Г. Ф., Цой А. Д. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах. — М.: Изд-во МЭИ, 1999. — 440 с.
10. Тепловые трубы / Под ред. Э. Э Шпильрайна. — М.: Мир, 1972. — 420 с.
11. Техвер Я. Х., Суй Х. Н., Темкина В. С. Закипание жидкости на пористой поверхности и гистерезис теплоотдачи. — Таллинн, 1989. — 47 с. — (Препринт /АН ЭССР).
12. Фаворский О. Н., Каданер Я. С. Вопросы теплообмена в космосе. — М.: Высш. шк., 1972. — 280 с.
13. Эва В. К., Асакьявичюс Й. П., Гайгалис В. А. Низкотемпературные тепловые трубы. — Вильнюс: Моклас, 1982. — 184 с.

Поступила в редакцию 20.02.09

A. G. Kostornov, A. A. Shapoval,
A. L. Moroz, G. A. Frolov, I. V. Shapoval

HEAT PIPES WITH CAPILLARY STRUCTURES ON THE BASIS OF COMPOSITE GRADIENT MATERIALS FOR SPACE AND AVIATION HEAT SYSTEMS ENGINEERING

Some results of development of heat pipes and elements of heat transfer systems in space and aviation assignment are presented. New types of basic elements in the capillary structures of heat pipes are offered and applied. Thermophysical characteristics of the developed heat pipes with composite capillary structures are researched. Such structures have some technical advantages in comparison with traditional designs, in particular, during the work of heat pipes against a direction of the gravitational force action.

К 70-летию со дня рождения доктора технических наук профессора Виктора Сергеевича ХОРОШИЛОВА



15 июня исполнилось 70 лет известному ученому в области ракетно-космической науки и техники доктору технических наук профессору Виктору Сергеевичу Хорошилову.

Родился В. С. Хорошилов в с. Арнаутово Красногвардейского района Белгородской области.

После окончания Харьковского авиационного института в 1962 г. был направлен в ГП «КБ «Южное» имени М. К. Янгеля», где работает до настоящего времени. Прошёл путь от инженера до старшего научного сотрудника — руководи-

теля подразделения конструкторского бюро, с 1987 г. он — начальник расчётно-теоретического сектора.

Работу в конструкторском бюро Виктор Сергеевич совмещает с преподавательской деятельностью. С 1986 г. до 1993 г. — доцент, а с 1993 г. до настоящего времени — профессор кафедры проектирования и конструкций летательных аппаратов физико-технического факультета Днепропетровского национального университета. В 1991 г. ему присуждена ученая степень доктора технических наук, а в 1994 г. присвоено учёное звание профессора.

В. С. Хорошилов — автор более 200 научных трудов и нескольких учебных пособий. Основные научные результаты его исследований опубликованы в монографиях «Динамика космических аппаратов с магнитными системами управления» (1978 г., в соавторстве), «Прикладные методы исследования управляемых механических систем» (1980 г., в соавторстве), «Ротационное движение космических тросовых систем» (2001 г., в соавторстве), «Динамика космических систем с тросовыми и шарнирными соединениями» (2007 г., в соавторстве), а также в 116 статьях, тезисах докладов и заявках на изобретения.

Теоретические положения и прикладные методы исследований

В. С. Хорошилова использованы при создании ряда систем управления движением и систем определения ориентации нескольких поколений космических аппаратов, в том числе се-

рий «Космос», «Интеркосмос», «Океан», АУОС, «Січ», «Микроспутник».

Под его научно-техническим руководством были осуществлены разработки динамических схем КА с магнитно-гравитационными и гравитационно-гироскопическими системами их ориентации и методы исследования вращательного движения таких аппаратов, а также разработки алгоритмы определения ориентации космических аппаратов как с невысокой, так и с прецизионной точностью по информации различных датчиковых средств.

Он разработал комплекс математических моделей деформируемых космических аппаратов как объектов управления, совокупность которых адекватно отражает реальные процессы в рассматриваемых аппаратах. Предложил ряд методов расчета частот и форм колебаний присоединенных упругих элементов космических аппаратов в виде различного рода панелей солнечных батарей, стержней, а также жидкости, частично заполняющей полости при наличии в них специальных типов разделителей жидкости и газа. Развил методы учета влияния подвижности вязкой вращающейся жидкости, частично заполняющей полость, в условиях космического полета. Предложил и внедрил в практику работ ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля» метод оценки динамических свойств деформируемого космического аппарата в процессе его проектирования и дал обоснование на базе этой оценки необходимости доработки исследуемой компоновочной схемы аппарата в неблагоприятных ситуациях. Обосновал принципы построения системы управления ориентацией космического аппарата универсального типа, основанной на использовании комплекса широкоугольных астротелевизионных датчиков, бортовой цифровой вычислительной машины, инерционных исполнительных органов (двухступенных силовых гироскопов, установленных по оригинальной схеме, или двигателей-маховиков), разгруз-

ка которых осуществляется с помощью магнитной системы. Разработал основные теоретические положения анализа характеристик и синтеза астротелевизионной системы управления ориентацией космического аппарата. Предложил методы исследования, нетрадиционные пути решения проблемы алгоритмического обеспечения астротелевизионной системы управления ориентацией деформируемого космического аппарата с учетом высоких требований к точности. Развил методы исследования и выбора оптимальных значений основных параметров магнитной системы разгрузки исполнительных органов системы управления ориентацией космического аппарата.

В последние годы В. С. Хорошилов успешно занимается разработкой проблем динамики космических вращающихся тросовых систем, провел ряд исследований, относящихся к развитию математических моделей и изучению динамики объектов космической техники как управляемых систем тел с односторонними связями, а также систем твердых и упругих тел изменяемой конфигурации. Он проводит большую научно-организационную работу по подготовке научных кадров. Подготовил четыре кандидата технических наук, руководит работой трех аспирантов.

В. С. Хорошилов был членом бюро секции Научного совета АН СССР по проблеме управления движением и навигации (1984–1991 гг.), неоднократно был председателем Государственной экзаменационной комиссии, является членом квалификационного специализированного совета Днепропетровского национального университета по защите кандидатских и докторских диссертаций. Он является координатором секций Международных научно-практических конференций, членом редколлегий научно-технических сборников, членом программных комитетов Международных конференций, иностранным членом Академии космонавтики им. К. Э. Циолковского.

*С. М. КОНЮХОВ
О. Л. МАКАРОВ
А. М. ПОПЕЛЬ*

БАТУРКІН Володимир Михайлович — докторант кафедри атомних електричних станцій та інженерної теплофізики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», кандидат технічних наук.

Напрямок науки — системи терморегулювання та передачі теплової енергії.

БРИЧЕВСЬКИЙ Микола — молодший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України.

Напрямок науки — технологія виробництва твердооксидних паливних комірок; електронна мікроскопія.

БРОДНІКОВСЬКИЙ Євген Миколайович — інженер II категорії Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України.

Напрямок науки — технологічні аспекти виробництва твердооксидних паливних комірок.

БРОДНІКОВСЬКИЙ Микола Павлович — завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — твердооксидні паливні комірки; механічні випробування; композиційні матеріали.

БРОДСЬКИЙ Лукаш (Brodský Lukáš) — Геоінформаційна компанія Gisat s.r.o., Чеська республіка, м. Прага, кандидат сільськогосподарських наук (PhD in Agriculture). Менеджер-координатор міжнародних проєктів.

Напрямок науки — геостатистичний аналіз і оцінювання природних ресурсів, моделювання і прогнозування врожайності сільськогосподарських культур.

БУШУЄВ Євген Іванович — головний науковий співробітник Державного підприємства «Дніпрокосмос», кандидат технічних наук.

Напрямок науки — системне проектування космічних систем спостереження Землі; оброблення даних дистанційного зондування Землі.

ВАСИЛЬЄВ Олександр Дмитрович — провідний науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — твердооксидні паливні комірки; механічні випробування; електронна мікроскопія; фізика руйнування полікристалів.

ВОЛОШИН В'ячеслав Іванович — директор Державного підприємства «Дніпрокосмос», кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — системи дистанційного зондування Землі, оброблення даних дистанційного зондування Землі; безпека життєдіяльності та екологічний моніторинг.

ГЛАВАЦЬКА Надія Іванівна — провідний науковий співробітник Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика металів.

ГЛАВАЦЬКИЙ Ілля Миколайович — науковий співробітник Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика металів.

ГЛУХИ Ладіслав — директор Інституту інформатики Словацької академії наук, доктор філософії.

Напрямок науки — Grid-технології, мультиагентні системи, паралельні та розподілені обчислення.

ГРИПІЧ Юлія Антонівна — аспірант Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України.

Напрямок науки — обробка супутникових даних, інфраструктура геопросторових даних.

ІЛЬІН Микола Іванович — аспірант Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України.

Напрямок науки — візуалізація геопросторових даних, високопродуктивні обчислення.

КОЗЛОВА Анна Олександрівна — молодший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — дослідження екологічних систем із застосуванням даних дистанційного зондування Землі.

КОНЮХОВ Станіслав Миколайович — Генеральний конструктор-Генеральний директор Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», академік Національної академії наук України. Лауреат Державної премії СРСР та Державної премії України.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

КОСТОРНОВ Анатолій Григорович — завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, академік Національної академії наук України, професор, доктор технічних наук.

Напрямок науки — фізика металів, проникних матеріалів, порошкової металургії, металургії металевих волокон, теплових труб.

КРАВЧЕНКО Олексій Миколайович — аспірант Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України.

Напрямок науки — дистанційне зондування Землі, асиміляція даних, високопродуктивні обчислення.

КУССУЛЬ Наталія Миколаївна — завідувач відділу космічних інформаційних технологій та систем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, доктор технічних наук, професор.

Напрямок науки — інтелектуальні обчислення, методи обробки супутникових даних, розподілені системи, Grid-технології, Sensor Web, дистанційне зондування Землі.

ЛАВРЕНЮК Алла Миколаївна — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — інтелектуальні обчислення, методи обробки супутникових даних, дистанційне навчання.

ЛУГОВИЙ Микола Іванович — старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — твердооксидні паливні комірки; композиційні матеріали; пошкоджуваність мікронеоднорідних матеріалів.

МАКАРОВ Олександр Леонідович — Головний конструктор-начальник КБ космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

МАЧЕХІН Юрій Павлович — завідувач кафедри фізичних основ електронної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки, доктор технічних

наук, професор. Лауреат Державної премії України в галузі науки та техніки, академік Академії наук прикладної електроніки.

Напрямок науки — модуляційна лазерна спектроскопія, оптичні стандарти частоти, динамічний хаос в лазерних і оптоелектронних системах, інформаційно-вимірювальні системи.

МОРОЗ Анатолій Леонтійович — старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — технології пористих металів, проникних матеріалів, порошкової металургії, металургії металевих волокон, теплових труб.

НЕГРІЙКО Анатолій Михайлович — заступник директора Інституту фізики Національної академії наук України, завідувач відділу лазерної спектроскопії, доктор фізико-математичних наук. Лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — лазерна спектроскопія, лазерна метрологія, взаємодія лазерного випромінювання з речовиною, керування рухом атомів, молекул, мікрочастинок за допомогою лазерів.

ПАРШИНА Ольга Іванівна — головний програміст Державного підприємства «Дніпрокосмос».

Напрямок науки — оброблення даних дистанційного зондування Землі.

ПОПЕЛЬ Анатолій Михайлович — заступник Головного конструктора-начальника КБ космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», лауреат Державної премії СРСР та Державної премії України.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

ПОПОВ Михайло Олексійович — заступник директора з наукової роботи Наукового центру аерокосмічних досліджень Інституту геологічних наук Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — аерокосмічні системи дистанційних досліджень Землі.

РОМАНЬКО Володимир Миколайович — директор наукового центру лінійних та часо-частотних вимірювань Національного наукового центру «Інститут метрології», кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрямок науки — стандарти частоти та методи їхніх досліджень.

САБЛІНА Валентина Іванівна — провідний інженер-програміст Державного підприємства «Дніпрокосмос».

Напрямок науки — оброблення даних дистанційного зондування Землі; розроблення нормативної бази щодо

оброблення та використання даних дистанційного зондування Землі.

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч — провідний науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — моделювання процесів енергомасообміну в геосистемах, дешифрування космічних знімків для визначення параметрів енергомасообміну у геосистемах, вирішення природоресурсних та природоохоронних задач, оцінка стану лісів та продуктивності агрофітоценозів на основі використання супутникових даних.

СИРОТЕНКО Олександр Васильович — завідувач лабораторії аерокосмічного зондування агросфери Інституту агроекології Української академії аграрних наук.

Напрямок науки — дистанційні методи зондування агресурсів.

СКАКУН Сергій Васильович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — інтелектуальні методи обробки даних, дистанційне зондування Землі, Sensor Web.

СЛЮНЯЄВ Віктор Миколайович — старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — твердооксидні паливні комірки; крихкі матеріали; міжзеренне руйнування

СОУКУП Томаш (Soukup Tomas) — Геоінформаційна компанія Gisat s.r.o., Чеська республіка, м. Прага, магістр в області геодезії і картографії (Master Degree in Geodesy and Cartography). Менеджер-координатор міжнародних проектів.

Напрямок науки — інтегрування просторових даних, цифрове оброблення аерокосмічних зображень, геоінформаційні системи.

СТАНКЕВИЧ Сергій Арсенійович — провідний науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат технічних наук, доцент.

Напрямок науки — оброблення, інтерпретація та оцінювання інформативності багато- та гіперспектральних аерокосмічних зображень і бортових оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі.

ТАРАРИКО Олександр Григорович — головний науковий співробітник Інституту агроекології Української академії аграрних наук, доктор сільськогосподарських наук, професор, академік Української академії аграрних

наук, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — охорона ґрунтів, моніторинг земель, захист ґрунтів від ерозії.

ФРОЛОВ Геннадій Олександрович — завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства Національної академії наук України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — високотемпературна теплофізика, геліотехніка та дослідження антифрикційних матеріалів при моделюванні космічних умов.

ШАПОВАЛ Андрій Андрійович — старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — теплофізика пористих матеріалів, двофазного теплообміну, систем охолодження, теплових труб.

ШАПОВАЛ Ірина Владленівна — молодший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, інженер-теплофізик.

Напрямок науки — теплофізика пористих матеріалів, двофазного теплообміну, теплових труб.

ШЕЛЕСТОВ Андрій Юрійович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — інтелектуальні обчислення, моделювання та розробка розподілених систем, Grid-технології, Sensor Web.

ШЕЛЕХОВ Андрій Олександрович — молодший науковий співробітник наукового центру оптичних та температурних вимірювань Національного наукового центру «Інститут метрології».

Напрямок науки — стабілізовані за частотою лазери та методи їхніх досліджень.

ШТЕЙНБЕРГЕР-ВІЛЬКЕНС Р. — доктор, технічний менеджер Дослідницького центру Юліха, Німеччина.

Напрямок науки — дизайн та системна оптимізація твердооксидних паливних комірок; порошкова металургія.

ЯЦЕНКО Леонід Петрович — директор Інституту фізики Національної академії наук України, завідувач відділу когерентної і квантової оптики, доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент Національної академії наук України, професор. Лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — фізика когерентної взаємодії атомних систем зі світлом, лазерна спектроскопія, фізика резонансних явищ у лазерах, лазерна метрологія, лазерне керування рухом атомів і молекул.