

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ІМ. І. М. ФРАНЦЕВИЧА

ПЕТРАШ КОСТЯНТИН МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.762.5

**ЗАКОНОМІРНОСТІ КЕРОВАНОГО РЕАКЦІЙНОГО СПІКАННЯ,
ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ЖАРОСТІЙКИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ**

Спеціальність 05.16.06 – «Порошкова металургія і композиційні матеріали»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ.

Науковий керівник доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Солнцев Віктор Петрович**, провідний науковий співробітник відділу реологічних та фізико-хімічних основ технології порошкових матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ.

Офіційні опоненти доктор технічних наук, доцент **Скачков Віктор Олексійович**, професор кафедри металургії Інженерного інституту Запорізького національного університету МОН України, м. Запоріжжя.

кандидат технічних наук, доцент **Мініцький Анатолій В'ячеславович**, доцент кафедри високотемпературних матеріалів і порошкової металургії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, м. Київ.

Захист відбудеться «10» лютого 2020 р. о 10:³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.207.03 Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України за адресою: 03142, м. Київ-142, вул. Кржижановського, 3.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України за адресою: 03142, м. Київ–142, вул. Кржижановського, 3.

Автореферат розісланий «19» грудня 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д.26.207.03 кандидат технічних наук



Хоменко О. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток нових галузей техніки визначається, головним чином, досягненнями у сфері розробки нового покоління функціональних матеріалів. Зокрема, в області авіакосмічної техніки, особливо при створенні гіперзвукових літальних апаратів та космічних систем багаторазового використання, прогрес пов'язаний із розробкою нових жароміцних і жаростійких матеріалів. Для забезпечення більшої надійності теплозахисту таких систем в наш час намітилась тенденція розробки стільникових теплозахисних панелей із металевих сплавів. Найкращими їх представниками, як правило, є дисперсно-зміцнені сплави підвищеної пластичності. Іноземними фірмами Cabot, Inco, Fansteel, Sherritt-Gorden, Special Metals та ін. розроблено ряд таких сплавів, де основними зміцнювачами при високих температурах є оксиди рідкоземельних елементів (торію, лантану, ітрію та ін.). Переважна частина технологій отримання такого роду сплавів розроблена на основі механохімічного синтезу.

Однак, густина таких матеріалів є достатньо великою. Крім того, вони мають ряд недоліків, обумовлених технологічною спадковістю. Наприклад, тривале розмелювання, зазвичай, є причиною підвищеного вмісту домішок впровадження: вуглецю, азоту та кисню у вигляді оксидів. Вуглець в процесі спікання і термомеханічної обробки виділяється у вигляді карбідів по границям зерен, знижуючи цим пластичність матеріалу. Азот утворює нітриди, які, подібно карбідам, є причиною зниження пластичності сплаву. Оксиди, здебільшого хрому, що утворюються на поверхні частинок, перешкоджають дифузійній гомогенізації сплаву, що призводить до зниження його жаростійкості.

Тенденція до збільшення вмісту таких елементів, як алюміній, титан, цирконій та ін. при розробці закордонних дисперсно-зміцнених сплавів породжує інтерес до створення такого роду матеріалів методами реакційного спікання. Це дасть можливість відмовитися від процесу тривалого розмелювання і, відповідно, уникнути накопичення домішок впровадження, що в свою чергу дозволить збільшити вміст алюмінію при збереженні високої технологічної пластичності.

У випадку підвищеного вмісту реакційних компонентів, в першу чергу алюмінію і титану, виділяється велика кількість теплової енергії в процесі реакційного спікання за рахунок екзотермічних реакцій синтезу інтерметалідів. Це, в свою чергу, приводить як до прискорення процесів сплавоутворення, так і до негативних явищ типу теплового вибуху чи, відповідно, розуцільнення заготовки. Тому цілеспрямоване керування цими процесами є однією з важливих задач щодо досягнення активного ущільнення за рахунок теплової енергії, що виділяється при взаємодії.

Таким чином, основним завданням, що постає перед автором пропонованої роботи є теоретичне та експериментальне вивчення механізмів реакційної взаємодії для цілеспрямованого керування процесом спікання та розробка на цій основі дисперснозміцнених ніхромів з підвищеним вмістом алюмінію.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертація відповідає основним науковим напрямкам досліджень Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України і виконана в рамках планових

держбюджетних і цільових тем. Наукові дослідження проведені автором в якості відповідального виконавця. Основні теми з відомчої тематики:

– «Фізико-хімічні основи технології псевдосплавів на основі систем (W, Mo, Cr)-Cu з використанням нанодисперсних порошоків тугоплавких металів при контрольованому та реакційному рідкофазному спіканні», (2011-2013 рр. № державної реєстрації: 0111U002401).

– «Вивчити структурно – кінетичні закономірності нерівноважних процесів в дисперсних системах та композиційних матеріалах, що ініційовані внутрішніми і зовнішніми високоенергетичними факторами; розробити принципи керування цими процесами як на стадії технології виготовлення матеріалу, так і при його експозиції в екстремальних умовах», (2014-2016 рр. № державної реєстрації: 0114U000229);

– «Дослідити закономірності ущільнення та формування гетерофазної мікроструктури при реакційному рідкофазному спіканні багатокомпонентних металічних систем; створити функціональні спечені матеріали з підвищеними характеристиками електроерозійної, зносо- та жаростійкості», (2017 – 2019 рр. № державної реєстрації: 0117U002453);

– «Розробка нових високотемпературних конструкційних та електротехнічних матеріалів з тривалим терміном використання», (2018 – 2019 рр. № державної реєстрації: 0118U006213).

Мета і завдання роботи. Мета – встановлення закономірностей реакційного спікання металічних композицій з хімічно інертними добавками щодо основи та розробка жаростійких дисперсно-зміцнених ніхромів.

Для досягнення даної мети в роботі вирішувались наступні завдання:

1. Теоретична розробка термокінетичних моделей та вивчення кінетики процесів реакційної взаємодії в системах Ni-Al і Ti-Al на основі синергетичного підходу за допомогою комп'ютерного експерименту;

2. Експериментальне вивчення термокінетики та механізмів реакційної взаємодії, ініційованих контактним плавленням компонентів в евтектичних і перитектичних системах Ni-Al, Ti-Al, Ni-Ti, Ni-Sn, Cu-Ti та Cu-Sn;

3. Дослідження макрокінетики реакційного спікання порошкових композицій на основі металічних систем Ni-Sn, Cu-Sn, Cu-Al, Ni-Al з інертними і взаємодіючими добавками: CaF₂, Y₂O₃, ZrO₂ і Si₃N₄;

4. Розробка керованої технології реакційного спікання жароміцних дисперсно-зміцнених сплавів на основі ніхрому, їх механічних і функціональних властивостей;

5. Визначення комплексу фізико-механічних та функціональних властивостей розроблених жаростійких та жароміцних дисперсно-зміцнених ніхромів.

6. Розробка технології термореакційної пайки деталей із розроблених дисперсно-зміцнених ніхромів з метою виготовлення конструкцій кромки повітрязабірника гіперзвукового літака і стільникових теплозахисних панелей багаторазових космічних апаратів.

Об'єкт дослідження – закономірності термокінетики реакційних процесів в порошкових реагуючих системах, механізми взаємодії і реакційного спікання з компонентами різної фізико-хімічної природи.

Предмет дослідження – реакційні порошкові композиції і матеріали на основі ніхромів, які дисперсно-зміцнені оксидом ітрію з підвищеним вмістом алюмінію та їх фізико-механічні і функціональні властивості.

Методи досліджень: При вивченні механізмів реакційної взаємодії були застосовані теоретичні та експериментальні методи. В теоретичних дослідженнях застосовано синергетичний підхід, в основі якого лежить локальний принцип проточного реактора.

При експериментальному дослідженні і виявленні механізмів взаємодії був застосований високошвидкісний метод запису термокінетики ендо- та екзотермічних реакцій з використанням аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), що дозволяло виводити на монітор безпосередньо температуру процесу та записувати її на електронний носій інформації у вигляді dat-файлів, які, зазвичай, оброблялися в програмі Origin та, за потреби, в інших програмах.

В процесі роботи також використовувались традиційні методи фізичного матеріалознавства: оптична металографія, рентгенографія, ваговий аналіз та ін.

Вивчення фізико-механічних властивостей – міцності на розрив, межі пропорційності та текучості, відносного видовження, утомної міцності виконувалися на типовому обладнанні і за стандартними методиками.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше проведено моделювання процесу реакційної взаємодії в системах Ni-Al, як основній реакційній складовій розроблених жаростійких ніхромів, і Ti-Al, як перспективного припою для них, з урахуванням впливу температурної залежності рівноважної концентрації тугоплавкого компонента в перитектичній рідині на характер термокінетичної траєкторії. Встановлено діапазони значень керуючих параметрів (констант швидкостей процесів, температур ініціювання реакції і зовнішнього середовища), що визначають ту чи іншу термокінетичну траєкторію. Показано області існування термокінетичних коливань, режимів експоненціального росту температури, а також інших видів термокінетичного розвитку процесу. З'ясовано вплив температур ініціювання процесу та зовнішнього середовища, констант швидкостей процесів на теплову поведінку зазначених реакційних систем.

2. Вперше експериментально встановлено колективну природу взаємодії в порошкових реагуючих системах Ni-Al, Ti-Al, Ni-Ti, Ni-Sn, Cu-Ti, Cu-Sn за результатами дослідження термокінетики реакційних процесів, ініційованих контактним плавленням. Виявлено два механізми синтезу інтерметалідів у вказаних вище реакційних системах, один з яких – це саморозповсюджувальний рух фронту реакції, а інший – детонаційний механізм, за якого відбувається одночасно екзотермічний спалах у всьому об'ємі зразка.

3. Вперше експериментально підтверджено автоколивальні зміни температури в області твердодіагностичного стану досліджених у роботі систем. Також зафіксовано асинхронні зміни температури за довжиною зразків, починаючи від поверхні нагріву, що свідчить про хвильове поширення тепла. Розкрито, що поведінка реакційної системи може бути незалежною в різних локальних об'ємах порошкових заготовок, коли термокінетичні траєкторії в них суттєво різняться за своїм характером.

4. Вперше встановлено, що введення певної кількості хімічно інертних добавок Y_2O_3 , CaF_2 , ZrO_2 локалізує реакційні процеси, які є причиною появи пор великого розміру. А дрібні пори (вакансії), утворені за рахунок уніполярної дифузії, беруть участь у масопереносі і роблять можливим протікання процесу спікання на пізніх стадіях.

Практичне значення отриманих результатів

Розроблено технологію реакційного спікання порошкових пресовок дисперсно-зміцнених нікелевих сплавів та отримано, на основі неї, нові жаростійкі сплави ніхрому Ni-20Cr з вмістом алюмінію до 6 % і оксиду ітрію (Y_2O_3) до 1,5 %.

Відпрацьовано режими прокатки масивних заготовок товщиною близько 40 мм і тонких листів до 0,1 мм з цих сплавів.

Розроблено склади припоїв та відпрацьовано технологію терморекційного паяння одержаних дисперсно-зміцнених ніхромів, яку успішно застосовано при пайці складових частин макету кромки повітрозбірника гіперзвукового літака і створенні конструкцій теплозахисних стільникових панелей багаторазових космічних апаратів.

Властивості отриманих матеріалів та виготовлених з них деталей забезпечують в комплексі працездатність теплозахисних конструкцій багаторазових космічних систем і гіперзвукових літальних апаратів при аеродинамічному нагріві до 1200 °С.

Результати досліджень застосовуються на ДП «КБ «Південне» при створенні перспективних конструкцій і виробів ракетно-космічної техніки, які працюють в умовах аеродинамічного нагріву в середовищі повітря за максимальних температур до 1200 °С (Акт впровадження наукових та практичних результатів від 25 травня 2017 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертантом спільно з керівником обґрунтовано мету, задачі роботи, проаналізовано та узагальнено отримані результати. Автор ввів у теоретичну модель залежності рівноважної концентрації тугоплавкого компонента у перитектичній рідині від температури. Теоретично, за допомогою власноруч розробленого програмного забезпечення, дослідив вплив температури запуску реакційного процесу на термокінетичну траєкторію. Обґрунтував необхідність врахування у фізико-хімічній моделі процесу перенесення тепла за допомогою теплового випромінювання, що теоретично дало можливість встановити реальні температури процесів. Здобувачем проведено дослідження експериментальної термокінетики в порошкових реагуючих системах, макрокінетики реакційного спікання та циклічної жаростійкості сплавів. За участю співавторів виконано роботи з отримання жаростійких дисперсно-зміцнених ніхромів, відпрацьовано технологію їх терморекційної пайки і виготовлено з них макети теплозахисних конструкцій авіакосмічної техніки.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на 18 конференціях: Друга Міжнародна науково-технічна конференція «Обчислювальний інтелект (ОІ-2013)» (Черкаси, 2013); V Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології (Київ, 2014); Международные Научные чтения им. чл.-корр. РАН И. А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов» (Москва,

2014); Труды IV Международной конференции «Материаловедение тугоплавких соединений» (Киев, 2014); Четверта Міжнародна науково-практична конференція «Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку» (Київ, 2014); XXVII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях (Саратов, 2014); III Міжнародна науково-практична конференція «Обчислювальний інтелект» (Черкаси, 2015); VII Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології» (Дніпропетровськ, 2015); V Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах» (Київ, 2015); Международные Научные чтения чл.-корр. РАН И. А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов» (Москва, 2016); E-MRS 2016 Fall Meeting in Warsaw (Warsaw, 2016); XIV Всеукраїнська науково-практична конференція «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» (Київ, 2016); 6-я Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее» (Днепр, 2017); JRC conference and workshop reports «Materials resistant to extreme conditions for future energy systems» (Kyiv, 2017); XI Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» (Київ, 2018); V Міжнародна науково-практична конференція «Обчислювальний інтелект» (Ужгород, 2019); Конференція «Функціональні матеріали для інноваційної енергетики» (Київ, 2019); 7th International conference “Space technologies: present and future” (Dnipro, 2019).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано **33** наукові праці, зокрема **14** статей у фахових вітчизняних та закордонних періодичних виданнях в галузі технічних наук, з яких **2** статті у виданні, що індексується в наукометричних базах даних «Scopus», **18** тез доповідей у збірниках відповідних наукових конференцій та **патент** України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, **6** розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Викладена на **7,4** авторських листах, включає **8** таблиць, **115** рисунків, **4** додатки, список використаних джерел із **104** найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито актуальність обраної теми, зазначено мету, основні завдання та методи дослідження, описана наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, подано інформацію щодо апробації основних результатів роботи та перелік публікацій по них.

У першому розділі проаналізовано основні підходи і принципи математичного опису взаємодії в порошкових системах за участю екзотермічних реакцій, ініційованих контактним плавленням, що були запропоновані в роботах різних дослідників цих процесів. Звернено увагу на синергетичний підхід при моделюванні та різні модифікації математичних моделей опису реакційних процесів, що базуються на ньому. Розглянуто основні причини росту та усадки порошкових пресовок при реакційному спіканні за участю рідкої фази та роль СВС при цьому. Проаналізовано експериментальні дослідження термодинаміки високотемпературних реакційних процесів та зазначено їх перспективну роль для

розробки технології керування цими процесами, які б дали можливість направити велику кількість хімічної енергії системи на консолідацію порошкової системи і формування заданої її структури. Зазначено, що саме це є основою майбутніх технологій створення матеріалів з новим рівнем фізико-механічних та функціональних властивостей. Проведено огляд основних світових промислових технологій отримання дисперсно-зміцнених металевих сплавів, зокрема німоніків та інконелів, і наведено їх основні фізичні властивості.

На базі літературного огляду зроблено висновки щодо актуальності роботи, сформульована мета та основні завдання досліджень.

У другому розділі описано методи та методики, що використовувалися при експериментальних та теоретичних дослідженнях. Перелічено вихідні матеріали та стисло описано устаткування, використане в роботі. Зазначено, що для проведення фундаментальних досліджень та отримання дисперсно-зміцнених жаростійких сплавів на основі ніхрому використовувалися порошки алюмінію розпиленого (АПП-4, ГОСТ 11069-74), нікелю карбонільного (ГОСТ 9722-79), хрому відновленого (ТУ 14-1-1474-75), титану електролітичного (ПТН-1 по ТУ 48-05-30-71), олова (марка ПО4 за ГОСТ 9723-73), міді електролітичної (ГОСТ 4960-2009), фториди кальцію і барію марки ЧДА, оксиди ітрію та цирконію (IV) ЧДА, нітрид кремнію синтезований.

Для розуміння взаємозв'язку та ролі процесів і умов при реакційній взаємодії в рамках теоретичних досліджень використано синергетичний підхід Солнцева В.П., оснований на локальному уявленні проточного реактора, в якості якого розглядається ділянка рідини, де реакційні процеси протікають в кінетичній області. В рамках цього підходу математичні моделі ускладнювалися по мірі виявлення вкладів тих чи інших процесів. Це робило все складнішою реалізацію аналітичного рішення математичних моделей. У зв'язку з їх нелінійністю і складністю використано чисельні методи Ейлера та Рунге-Кутти. Для їх практичної реалізації розроблено програмне забезпечення в середовищі Visual Basic 6.0, а також в MathCad та MatLab.

В рамках експериментальних досліджень при вивченні термодинаміки використовувалися надчутливі X-A термодари, встановлені в отвори досліджуваних зразків, що нагрівалися в трубчатій печі опору з боку торця. Реєстрація зміни температури реакційної системи здійснювалася за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) з частотою 80 кГц і фактичною дискретністю запису на комп'ютер 1 кГц.

Дослідження кінетики спікання модельних порошкових сумішей та отримання жаростійких і жароміцних дисперсно-зміцнених ніхромів проводилося в печі СНОЛ 7,2/1300 на повітрі або у вакуумній печі СНВ-1 3 1 / 16И1. Зразки, що спікалися, отримували шляхом перемішування порошкової суміші потрібного складу в ексцентриковому змішувачі протягом 6 годин разом з кулями ШХ15 та наступним пресуванням в сталевих пресформах на гідравлічному пресі ПСУ-50.

Також описано стандартні методи досліджень мікроструктури, фазового і хімічного складу матеріалу, жаростійкості, механічних і функціональних властивостей.

Третій розділ присвячений проведеним теоретичним дослідженням термодинаміки реакційних процесів в перитектичних та евтектичних системах.

Процеси, що протікають, спочатку було представлено у вигляді проточного реактора ідеального змішування і запропоновано термокінетичну модель для їх опису на основі синергетичного підходу Солнцева В.П. та ін.

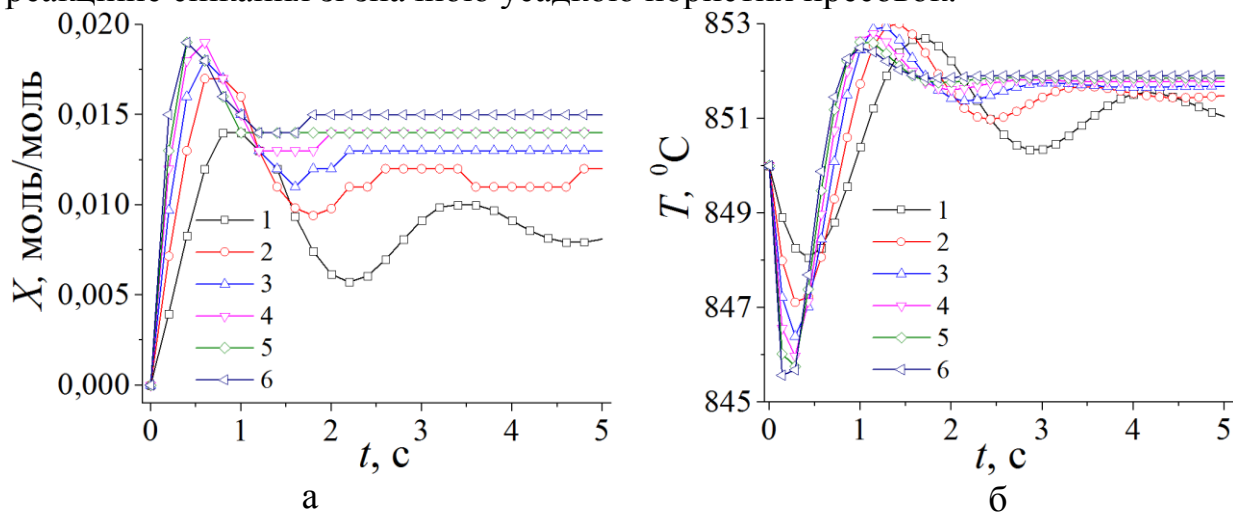
$$\dot{X} = k_1(a(T) - X) - k_2 X - k_3 \frac{l}{h}(T - T_a) \quad (1.1)$$

$$C\dot{T} = -k_1(a(T) - X)h + k_2 XH + g - l(T - T_a) \quad (1.2)$$

де X – фактична концентрація розчиненого тугоплавкого компонента в рідкому розплаві, $a(T)$ – його рівноважна концентрація в розплаві залежно від поточної температури, k_1 і k_3 – константи швидкостей розчинення та кристалізації тугоплавкого компонента, відповідно, k_2 – константа швидкості екзотермічної реакції синтезу інтерметаліду, h – ентальпія розчинення твердого тугоплавкого компонента в розплаві, H – ентальпія реакції синтезу, C – теплоємність, l – коефіцієнт теплопровідності, T – температура, T_a – температура оточуючого середовища (зазвичай печі).

Для моделювання було обрано системи Ni-Al та Ti-Al, оскільки саме алюміній виступав у ролі реакційного компонента в розроблюваних ніхромах, а система Ti-Al розглядалася як перспективна для виготовлення припою і терморекційної пайки деталей одержаних матеріалів.

В програмному середовищі Visual Basic 6.0 було розроблено програмне забезпечення, що дозволяло вирішувати дану систему двох диференціальних рівнянь з двома невідомими чисельними методами та в інтерактивному режимі у графічному вікні варіювати будь-яким параметром моделі і одночасно відслідковувати термокінетичну поведінку системи, відшуковуючи ті значення параметрів, при яких будуть забезпечені найбільш сприятливі умови протікання процесів. Рішенням моделі показано (рис. 1), що за різних значень параметрів можливі різні термокінетичні траєкторії, як то різке падіння чи зростання температур, тепловий вибух чи термокінетичні коливання, при яких в реальних процесах забезпечується реакційне спікання зі значною усадкою пористих пресовок.



а – концентраційна залежність; б – температурна залежність

Рисунок 1 – Зміна концентрації титану і температури перитектичної рідини за часом при: $k_1=1, 2, \dots, 6$ (криві 1-6 відповідно), $k_2 = 0,1$, $k_3 = 100$

Поряд з цим, в програмному середовищі MathCad 2015 було отримано за моделлю (1.1), (1.2) та побудовано поверхні залежностей частоти термокінетичних коливань від значень констант швидкостей процесів розчинення та хімічної реакції (рис. 2). Це, в подальшому, дозволить визначати діапазон значень параметрів при яких проведення процесу буде найбільш доцільним.

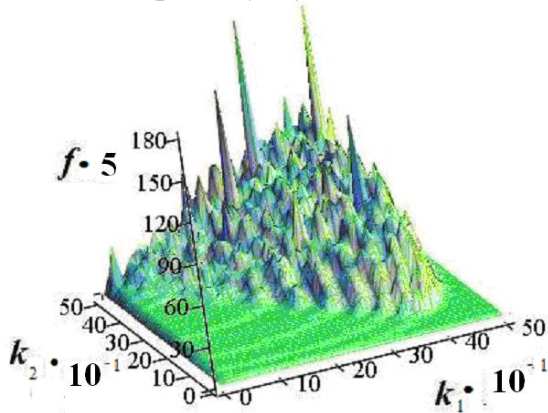


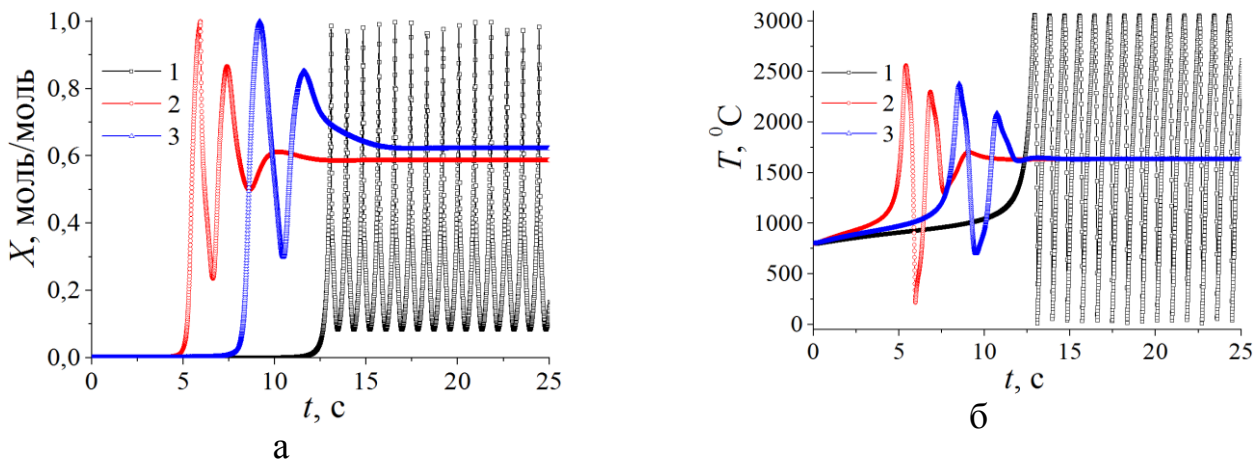
Рисунок 2 – Поверхня відображення кількості коливань в системі за час 5 с при: $k_1 = 0,1, 0,2, \dots, 5$, $k_2 = 0,1, 0,2, \dots, 5$, $k_3 = 10$ зроблено в удосконаленому варіанті моделі (1.3), (1.4):

$$\frac{dX}{dt} = k_1(a - X) - k_2 e^{\frac{-E}{RT}} X^m (1 - X)^n - k_3 \frac{X}{T} \quad (1.3)$$

$$C \frac{dT}{dt} = -k_1(a - X)h + k_2 e^{\frac{-E}{RT}} X^m (1 - X)^n H + k_3 \frac{X}{T} h - l(T - Ta) \quad (1.4)$$

де m і n – індекси при тугоплавкому та легкоплавкому металі в інтерметаліді.

Результати рішення моделі (1.3), (1.4) підтвердили залежність різної за характером термокінетичної поведінки системи не лише від значень констант швидкостей процесів, а й від виду інтерметаліду, що утворюється (рис. 3).



а – концентраційна залежність; б – температурна залежність

Рисунок 3 – Кінетика зміни концентрації титану і температури в реакційній системі Ti-Al при: $k_1 = 1$, $k_2 = 0,1$, $k_3 = 10$, $T_a = 660$ °C, $T_0 = 800$ °C у разі утворення інтерметалідів: 1 – TiAl; 2 – TiAl₃; 3 – Ti₃Al

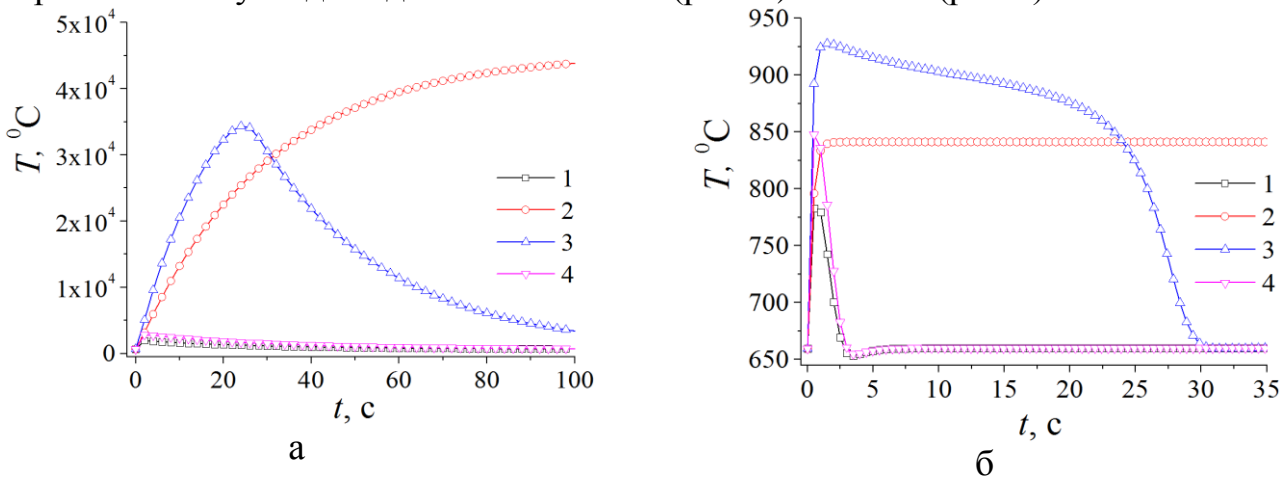
Однак, на спів розмірність теоретичних та експериментальних величин, зокрема температури та часу протікання процесу, як виявилось, дуже впливає правильне визначення ролі того чи іншого способу теплообміну між системою і зовнішнім середовищем. З'ясувалося, що за температур синтезу інтерметалідів домінуючу роль починає відігравати передача тепла за допомогою теплового випромінювання, що підпорядковується закону Стефана-Больцмана. І, при дослідженнях, її обов'язково треба враховувати. Зокрема, в моделі вона відобразилась наступним чином:

$$\frac{dX}{dt} = k_1[a(T) - X] - k_2 e^{\frac{-E}{RT}} X^m (1-X)^n - k_3 \frac{X}{T} \quad (1.5)$$

$$C \frac{dT}{dt} = -k_1[a(T) - X]h + k_2 e^{\frac{-E}{RT}} X^m (1-X)^n H + k_3 \frac{X}{T} h - l(T - T_a) - \varepsilon \sigma T^4 + \varepsilon \sigma T_a^4 \quad (1.6)$$

де $\varepsilon \sigma T^4$ і $\varepsilon \sigma T_a^4$ – енергія, що, відповідно, випромінюється одиницею площі системи у зовнішнє середовище чи поглинається із нього за одиницю часу.

Для оцінки ролі фактору теплового випромінювання було порівняно траєкторії зміни температур без врахування та при входженні цього фактору теплопереносу в термокінетичну модель для систем Ti-Al (рис. 4) та Ni-Al (рис.5).

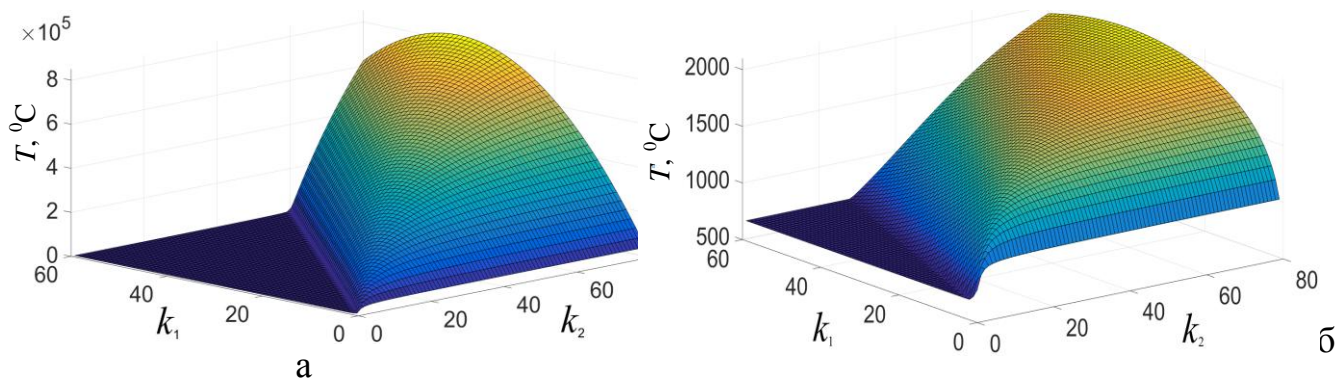


а – без урахування фактору теплового випромінювання в моделі;

б – з урахуванням фактору теплового випромінювання при моделюванні

Рисунок 4 – Термокінетика процесів взаємодії в реакційній системі Ti-Al при: $k_1 = 1$, $k_2 = 3,95$, $k_3 = 1$, $T_a = 660$ $^{\circ}\text{C}$, $T_0 = 660$ $^{\circ}\text{C}$ у випадку утворення: 1 – Ti_3Al ; 2 – TiAl ; 3 – TiAl_2 ; 4 – TiAl_3

Як бачимо з рис. 4-5, саме врахування фактору перенесення тепла випромінюванням дозволяє отримати абсолютні значення модельних температур в системі співрозмірні тим, що, зазвичай, фігурують в реальних експериментальних дослідженнях (рис. 6, 8, а, б). Особливо це актуально для значень параметрів, при яких величини поглинання та виділення тепла значно різняться (рис. 5).

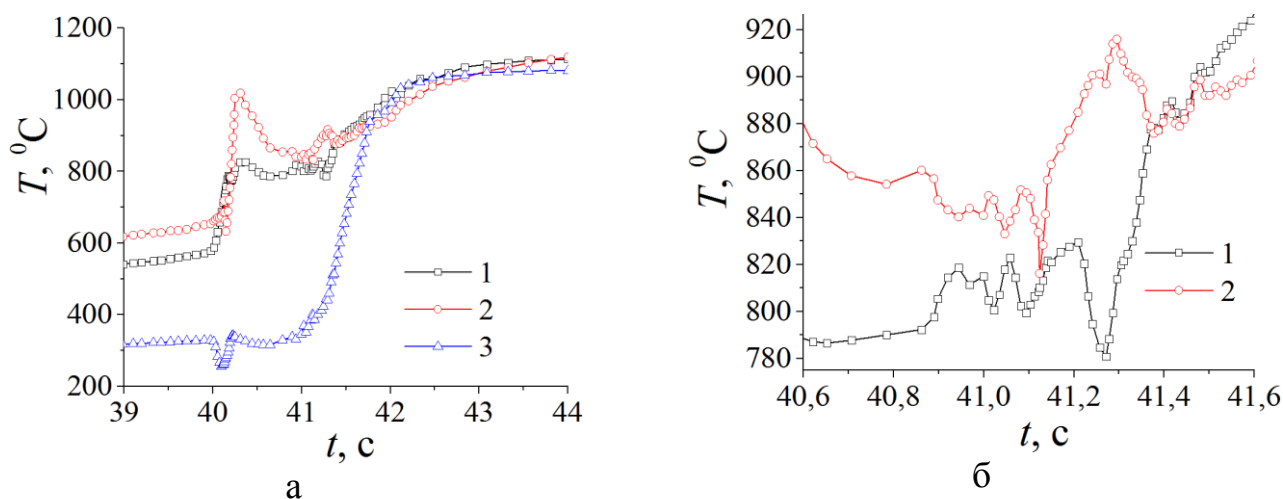


а – без урахування фактору теплового випромінювання в моделі;
 б – з урахуванням фактору теплового випромінювання при моделюванні

Рисунок 5 – Поверхні модельних максимальних температур в системі Ni-Al в процесі синтезу інтерметаліду NiAl при: $k_1 = 1, 2, \dots, 60$; $k_2 = 1, 2, \dots, 80$; $k_3 = 1$, $T_a = 660 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_0 = 660 \text{ }^\circ\text{C}$

У четвертому розділі представлено результати дослідження експериментальної термокінетики, що спостерігається при спіканні модельних порошкових реакційних систем за наступних різних співвідношень реагуючих компонентів: **Ni-Al** (Ni-10Al, Ni-17Al, Ni-33Al, Ni-42Al, Ni-47Al, Ni-65Al), **Ti-Al** (Ti-20Al, Ti-40Al, Ti-62,7Al, Ti-75Al), **Ni-Ti** (Ni-15Ti, Ni-85Ti), **Ni-Sn** (Ni-20Sn, Ni-40Sn, Ni-67,5Sn), **Cu-Ti** (Cu-15Ti), **Cu-Sn** (Cu-15Sn). Система Ni-Al була обрана як реакційна складова розроблюваних ніхромів, а системи Ti-Al, Ni-Ti, Ni-Sn, Cu-Ti та Cu-Sn розглядалися як можливі перспективні припої для терморекційної пайки деталей з цих сплавів.

Отримані термокінетичні криві (рис.6) підтвердили теоретичні припущення,



а – загальний вигляд, б – фрагмент

Рисунок 6 – Термокінетика контактної взаємодії в порошковій суміші Ni-10Al: 1, 2, 3 – покази термопар, встановлених по довжині зразка на відстані 2, 6 і 10 мм від поверхні нагріву

що реакційна взаємодія починається разом з появою рідкої фази (рис. 6, а, криві 1-2), а також при дещо нижчих температурах, якщо має місце сильна деформація компонентів порошкової суміші в локальному об'ємі зразка (рис. 6, а, крива 3). Як видно з кривих (рис. 6, а), на великих часових інтервалах початок реакційної взаємодії, проявляється переходом від лінійного росту температури під час рівномірного нагріву до різкого експоненціального підйому температури, що свідчить про початок процесу самозагострення унаслідок саморосповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС). Хоча на менших часових інтервалах разом з початком стадії самозагострення в системі починають

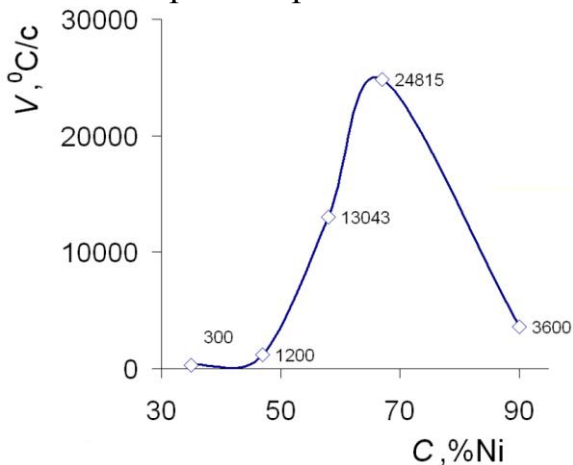
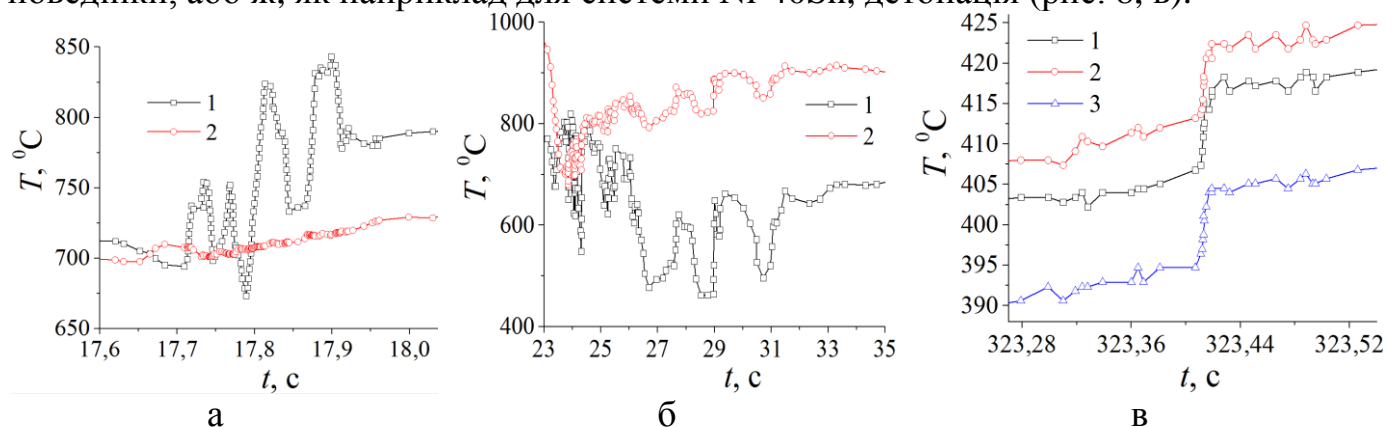


Рисунок 7 – Залежність максимальних швидкостей росту температури в системі Ni-Al від концентрації реагуючих компонентів

протікати термокінетичні коливання (рис. 6, б), як наслідок конкуренції процесів взаємодії. Помітним стає також хвильовий характер переносу тепла, про що свідчать асинхронні осциляції температури, які знаходяться в протифазі одна з одною в різних об'ємах зразка у місцях встановлення термопар.

Дослідження ролі концентрації компонентів реакційної суміші в процесах взаємодії показало, що найбільша швидкість росту температури системи спостерігається при стехіометричному співвідношенні компонентів, як показано для системи Ni-Al (рис. 7).

Крім СВС та асинхронних коливань, при реакційній взаємодії в порошкових сумішах, наприклад Ti-40Al, можливі також незалежна (рис. 8, а), синхронна (рис. 8, б) термокінетичні поведінки, або ж, як наприклад для системи Ni-40Sn, детонація (рис. 8, в).



а – незалежна поведінка; б – синхронна поведінка; в – детонація

Рисунок 8 – Термокінетика контактної взаємодії в порошковій суміші Ti-40Al (а, б) та Ni-40Sn (в): 1, 2, 3 – покази термопар, встановлених за довжиною зразка на відстані 2, 6 і 10 мм від поверхні нагріву

У п'ятому розділі представлено результати вивчення закономірностей спікання як чистих подвійних реакційних систем нікелю з оловом Ni-(20%, 25%, 36%, 50%, 67,5%, 75%, 80%)Sn, міді з оловом Cu-10%Sn, міді з алюмінієм Cu-(20%, 30%, 85%)Al, так і систем з різним вмістом інертних не змочуваних (CaF_2 , Y_2O_3 , ZrO_2) та слабо (Y_2O_3 в системах з алюмінієм і міддю) і сильно (Si_3N_4 , Y_2O_3 в системах титану з алюмінієм без розчинення тугоплавкої складової) взаємодіючих домішок за різних температур, тривалості спікання і пористості сирих пресовок.

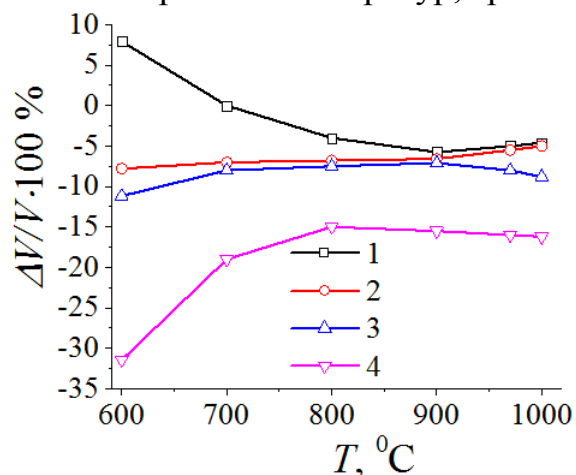
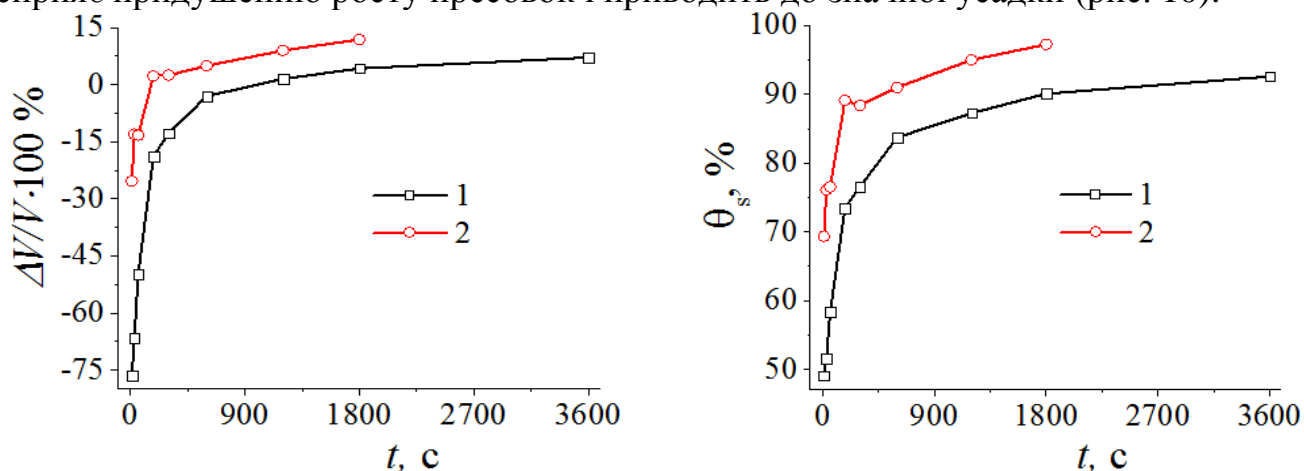


Рисунок 9 – Залежність об'ємних змін від температури реакційного спікання пресовок Cu-20Al на протязі 600 с з густиною (1) 74,5 %, (2) 80,5 %, (3) 84,6 %, (4) 91,0 %

значний ріст об'єму. Але з часом він сповільнюється і змінюється тенденцією до усадки, яка, як правило, з певного моменту часу припиняється (рис. 9). Це пов'язано з тим, що великі пори, що виникли при коагуляції численних менших, не зникають. Виникнення великих каверн пов'язано із реакційною кристалізацією інтерметалідів.

Введення певної кількості хімічно інертних домішок локалізує реакційні процеси в об'ємі пресовок і не дає змоги дрібним порам збиратися в каверни, що сприяє придушенню росту пресовок і приводить до значної усадки (рис. 10).



а – криві усадки; б – криві відносної густини

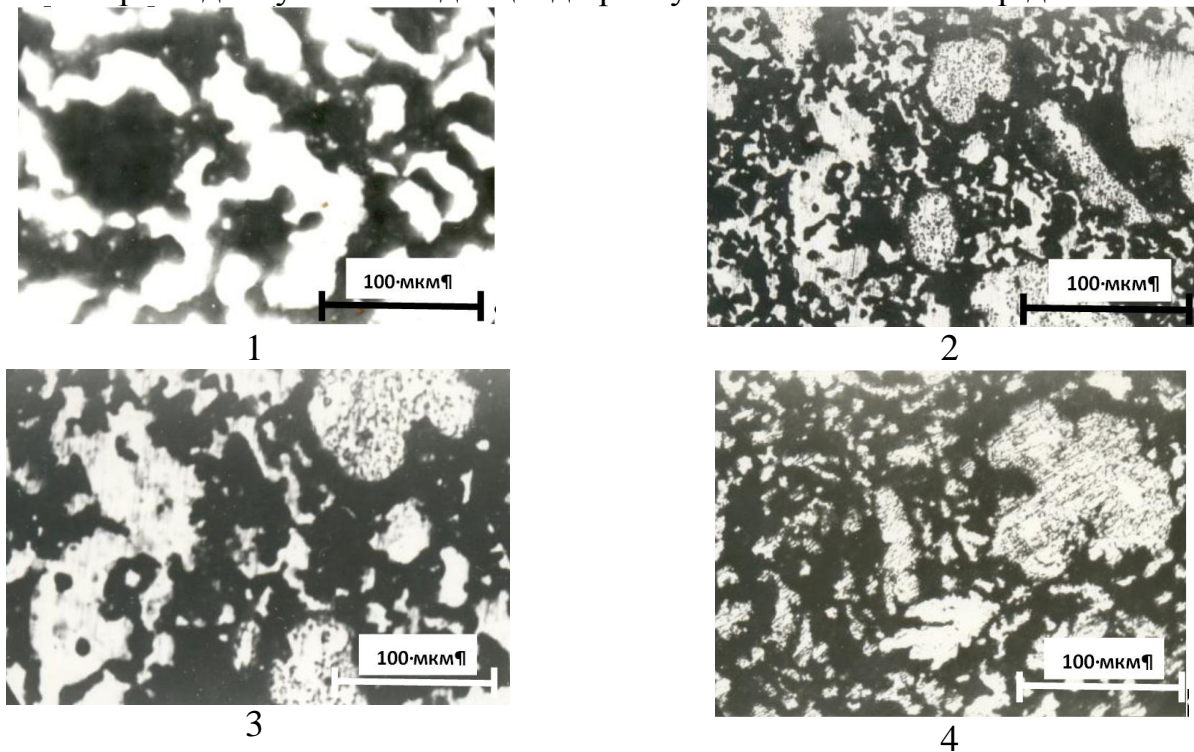
Рисунок 10 – Кінетика реакційного спікання порошкових композицій (Ni-67,5%Sn) + 25% об. CaF_2 з відносною густиною 86,8 % при: 1- 850 °C; 2- 925 °C

Отримані криві спікання показали, що процес ініціюється за умов, які відповідають появі перитектичної чи евтектичної рідини. При цьому характер об'ємних змін, в першу чергу, залежить від швидкості та теплових ефектів реакційних процесів і, в меншій мірі, визначається густиною сирих заготовок, температурою печі та тривалістю спікання. Це пояснюється тим, що при сильно екзотермічних реакціях система розігрівається до значно вищих ніж у печі температур.

Виявлено, що на початковій стадії спікання зразки практично усіх досліджених порошкових подвійних систем густиною понад 80 % дають

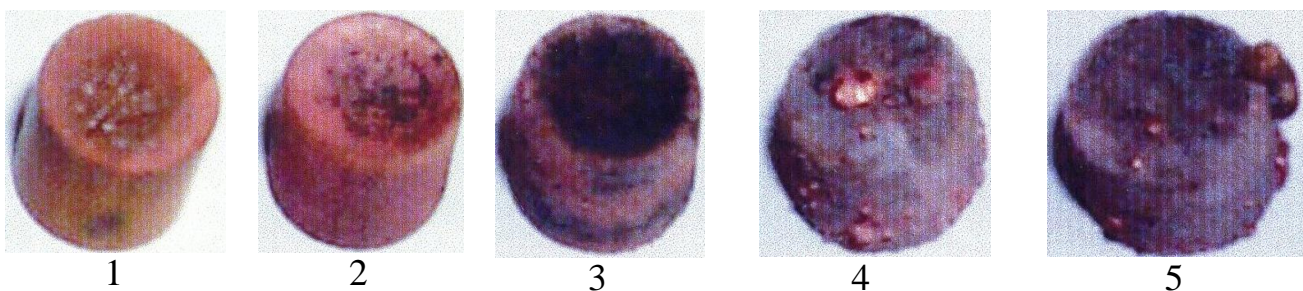
Дрібні пори, що утворилися за рахунок уніполярної дифузії, беруть участь в масопереносі і забезпечують процес ущільнення на пізніх стадіях спікання. При цьому, якщо металічна складова системи в умовах спікання знаходиться в області твердо-рідкого стану, для якого характерна висока в'язкість, то її витікання не відбувається, незважаючи на високий вміст не змочуваної домішки.

Проте дослідження мікроструктури (рис. 11) і еволюції форми (рис. 12) спечених модельних заготовок системи $\text{Cu-6\%Ti-25\%об.СаF}_2$ показує, що на початковому етапі відбувається змочування рідиною. Однак зі збільшенням витримки прослідковується тенденція до розбухання та витікання рідини.



1 - 30 с; 2 - 300с; 3 - 450 с; 4 – 600 с

Рисунок 11 – Мікроструктура (Cu-6\%Ti) - 25% об. СаF_2 спеченої при $1000\text{ }^\circ\text{C}$



1 – 30 с; 2 – 300с; 3 – 450 с; 4 – 600 с; 5 – 900 с

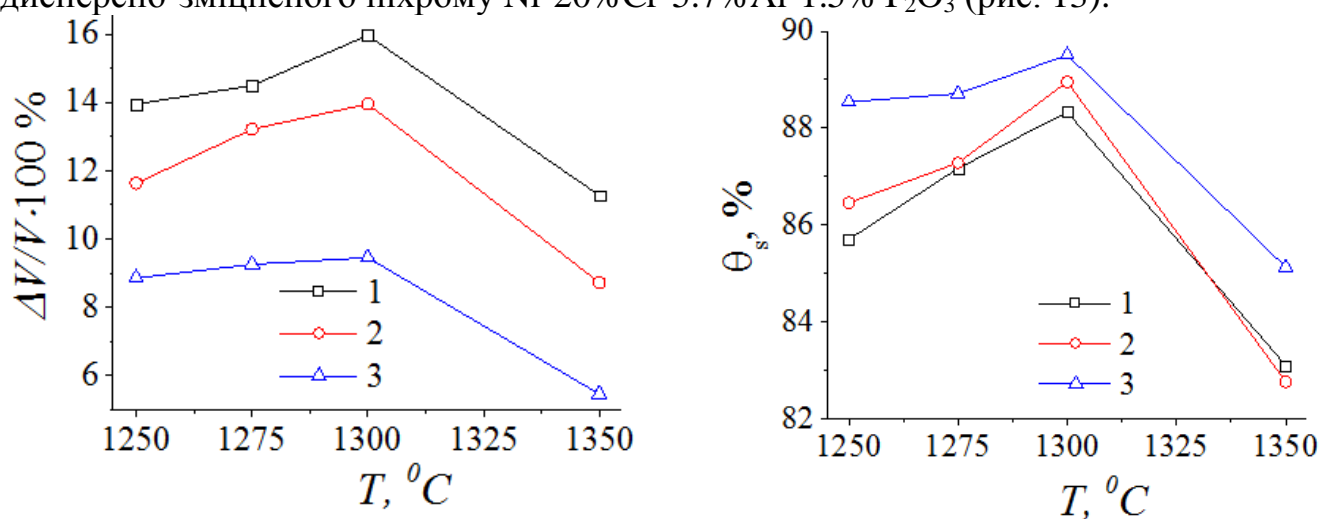
Рисунок 12 – Еволюція форми при реакційному спіканні порошкової композиції (Cu-6\%Ti) – 25% об. СаF_2 в процесі ізотермічної витримки при $1000\text{ }^\circ\text{C}$

Встановлені закономірності реакційного спікання металічних систем заклали основи цілеспрямованого керування величиною об'ємних змін пресовок реагуючих сумішей, дозволивши керувати процесами формування властивостей розроблюваних композиційних матеріалів.

Шостий розділ дисертаційної роботи присвячений практичній реалізації результатів теоретичних та експериментальних досліджень процесів реакційного спікання металічних композицій, що містять не взаємодіючі сполуки, а також розробці керованих технологій спікання жароміцних та жаростійких дисперсно-зміцнених сплавів на основі ніхрому і термореакційній пайці жаростійких конструкцій авіакосмічної техніки із заготовок цих матеріалів.

При розробці сплавів використовувалися порошки карбонільного нікелю розміром частинок менше 10 мкм та легуючих компонентів хрому і алюмінію, розміром не більше 40 мкм. У якості дисперсно-зміцнюючої сполуки використовувався наноксид ітрію Y_2O_3 , розміром частинок до 40 нм.

Далі було проведено ряд експериментальних досліджень по формуванню та спіканню як порошкових сумішей без дисперсно-зміцнюючої добавки наноксиду ітрію, так і сплавів з цією добавкою. Наприклад досліджувалось спікання дисперсно-зміцненого ніхрому $Ni-20\%Cr-5.7\%Al-1.5\%Y_2O_3$ (рис. 13).

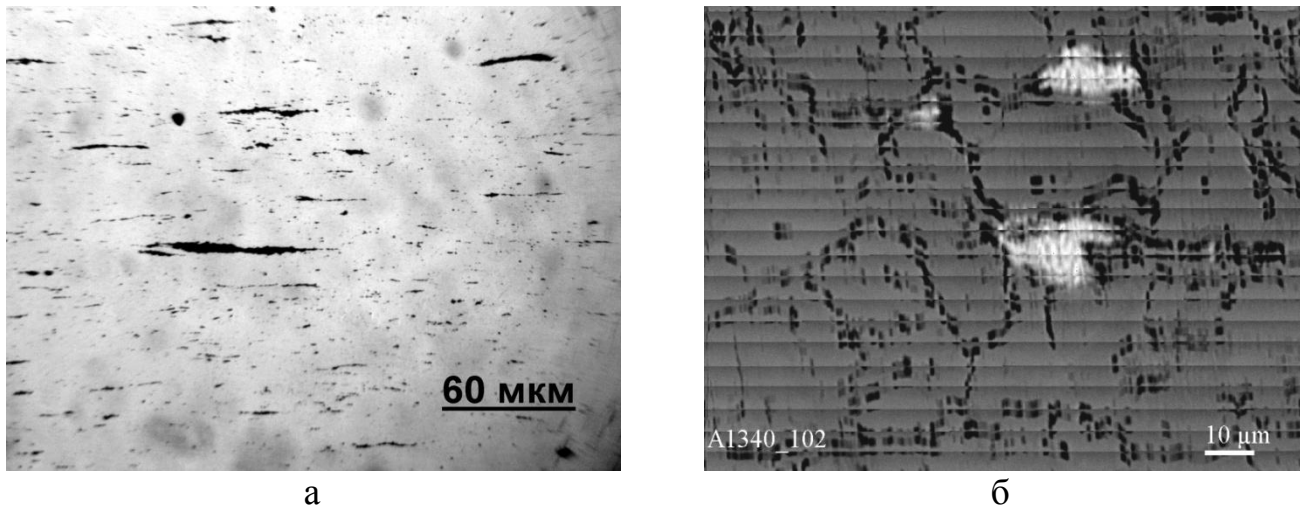


а – криві усадки; б – криві відносної густини

Рисунок 13 – Кінетика реакційного спікання дисперсно-зміцнених порошкових композицій $Ni-20\%Cr-5,7\%Al-1,5\%Y_2O_3$ протягом 1 години із відносною густиною: 1 – 74,5 %; 2 – 76,5 %; 3 – 81 %

Результати показали, що максимальна усадка при спіканні спостерігається за температури 1300 $^{\circ}C$ (рис. 13). За вищих температур спостерігається падіння усадки через ініціювання процесу розкладу нітридів хрому і виділення азоту.

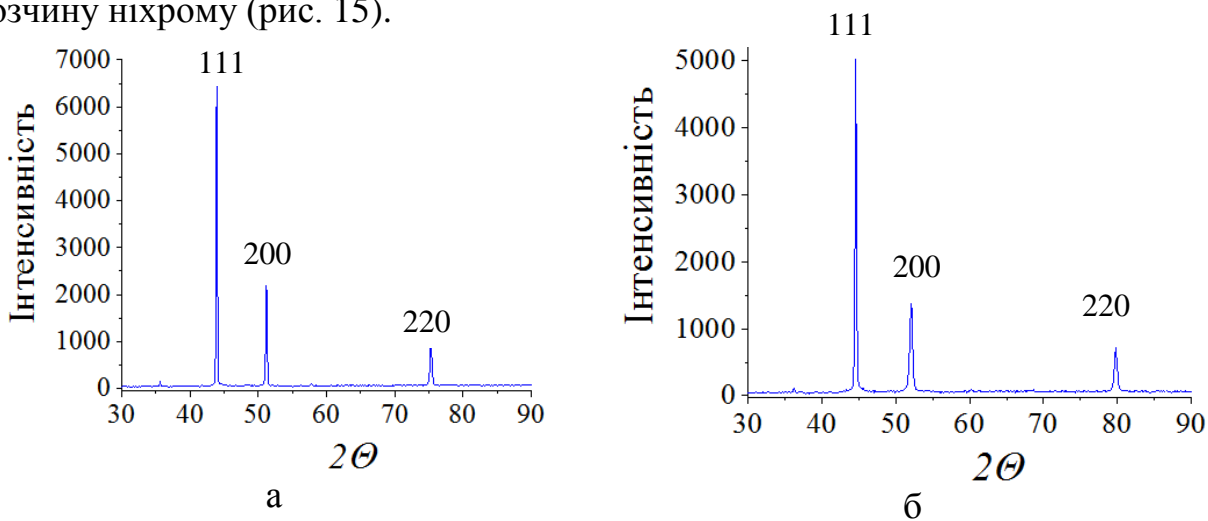
Дослідження мікроструктури розроблених сплавів, зокрема вже згаданого $Ni-20Cr-5,7Al-1,5Y_2O_3$, підданих прокатці при 1100 $^{\circ}C$ виявило, що вони мають у своєму складі відкриту та закриту пористість, що сплющується при прокатці (рис. 14, а). При значному збільшенні у відображених електронах вдається розглядіти зерна дисперсного інтерметаліду (рис. 14, б).



а – у світловому мікроскопі; б – у відображених електронах

Рисунок 14 – Мікроструктура непрутравленого шліфа ніхрому Ni-20Cr-5,7Al-1,5Y₂O₃ після прокатки

Типові рентгенограми зразків сплаву Ni-20%Cr-5,7%Al-1,5%Y₂O₃, спечених за температур 1250, 1275, 1300, 1350 °С протягом однієї години у вакуумі і при повільному охолодженні з піччю підтвердили утворення гомогенного твердого розчину ніхрому (рис. 15).



а – 1250 °С; б – 1300 °С

Рисунок 15 – Рентгенограми сплаву Ni-20%Cr-5,7%Al-1,5%Y₂O₃ спеченого у вакуумі протягом 1 години

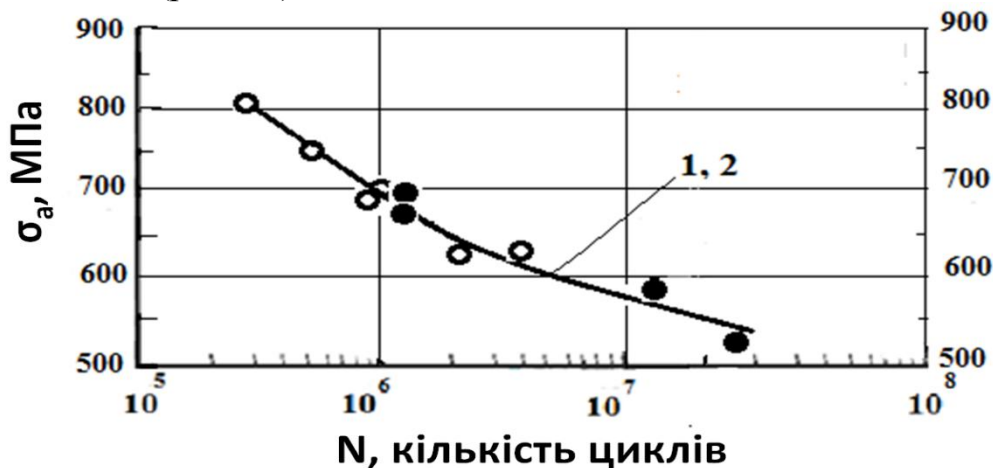
Властивості всіх розроблених сплавів представлені в таблиці 1, з якої видно, що максимальною жароміцністю володіє сплав Ni-20Cr-5,95Al-1Y₂O₃

Дослідження технологічних особливостей обробки дисперсно-зміцненого сплаву Ni-20%Cr-5,7%Al-1,5%Y₂O₃ показало, що оптимальною для одержаного сплаву є холодна прокатка зі ступенем обтискання не більше 10% та з подальшим відпалом за температури 1250 °С. Для пайки розробленого жароміцного дисперсно-зміцненого сплаву Ni-20%Cr-5,7%Al-1,5%Y₂O₃ оптимальним виявився припой складу Ni-10%Ti-5%Al, що за температури 1300 °С забезпечує міцне з'єднання і кристалізується протягом півгодинної витримки.

Таблиця 1 – Властивості розроблених дисперсно-зміцнених ніхромів

Характеристика	T °C	ЮИПМ-1200 (аналог)	Ni-20Cr-3Al-1,5Y ₂ O ₃	Ni-20Cr-5,7Al-1,5Y ₂ O ₃	Ni-20Cr-5,95Al-1Y ₂ O ₃
Густина		8300 м ³ /кг	7950 м ³ /кг	7500 м ³ /кг	7500 м ³ /кг
Границя міцності при розтягуванні, σ_b , МПа	20	738	1020	1021	1005
	800	237	542	578	999
	1100	45	-	-	-
	1200	не працює	40	48	56
Границя міцності, $\sigma_{0,2}$, МПа	20	364	624	713	760
	800	228	457	286	687
	1100	40	-	-	-
	1200	не працює	35	-	51
Відносне видовження, $\delta\%$	20	36,5	21	17,6	12,9
	800	36,7	18,1	0,2	1,1
	1100	32,8	18	-	-
	1200	не працює	18	-	22,3
Відносне звуження, $\psi\%$	20	34,2	22	14	14
	800	32,6	19	-	-
	1100	19,0	-	0,2	2,0
	1200	не працює	20	-	25

Дослідження утомної міцності розроблених сплавів на базі випробувань $N = 10^7$ циклів показало, що сплави отримані шляхом реакційного спікання втрачають свою порошкову природу і, завдяки цьому, володіють високою циклічною довговічністю. Для сплаву складу Ni-20Cr-5,7Al-1,5Y₂O₃ ця величина складає 570 МПа (рис. 16), що більше необхідного значення $0,4\sigma_s = 400$ МПа.

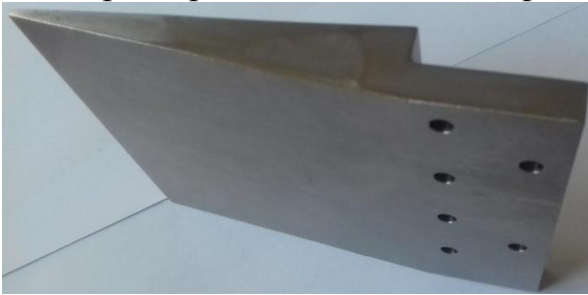


1- вздовж прокатки; 2 – впоперек прокатки

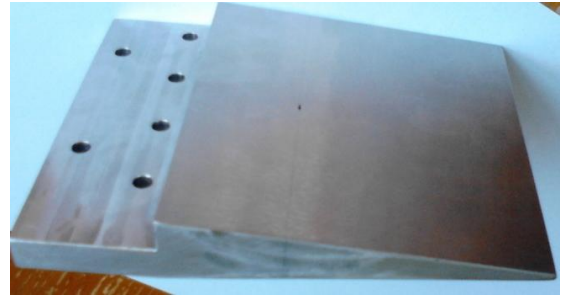
Рисунок 16 – Утомні криві ніхрому Ni-20Cr-5,7Al-1,5Y₂O₃ при консольному згині на частоті 2кГц

На основі одержаних результатів шляхом багаторазових холодних прокаток з відпалом та подальшої терморекційної пайки вдалося отримати великогабаритний

макет кромки повітрязабірника гіперзвукового літака (рис. 17), матеріал якого за своїми характеристиками значно перевершує всі технічні вимоги до нього.



а

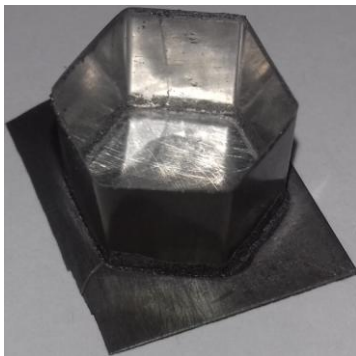


б

а – вид знизу; б – вид зверху

Рисунок 17 – Макет кромки повітрязабірника складу $\text{Ni-20Cr-3Al-1,5Y}_2\text{O}_3$

Крім того, з найбільш жаростійкого розробленого дисперсно-зміцненого сплаву складу $\text{Ni-20Cr-5,95Al-1Y}_2\text{O}_3$ було виготовлено, із використанням терморекційної пайки, макет теплозахисної панелі багаторазового космічного апарату, властивості матеріалу якого перевищують висунуті конструкторами ДП «КБ «Південне» технічні вимоги (рис. 18).



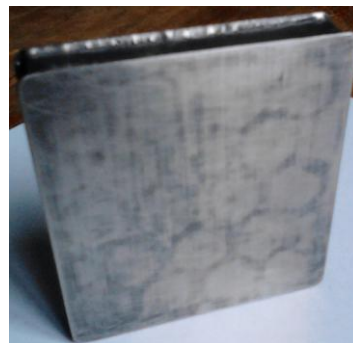
а



б



в



г

а – елементарний фрагмент; б, в, г – без, з однією та з двома припаяними кришками відповідно

Рисунок 18 – Макет теплозахисної стільникової панелі багаторазового космічного апарату з розробленого сплаву $\text{Ni-20Cr-5,95Al-1Y}_2\text{O}_3$

Усі властивості розроблених матеріалів та конструкцій з них забезпечують працездатність теплозахисних конструкцій багаторазових космічних систем при аеродинамічному нагріві до $1200\text{ }^\circ\text{C}$.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача дослідження закономірностей реакційного спікання металічних композицій, які містять невзаємодіючі сполуки та розроблено технологію отримання дисперсно-зміцнених ніхромів і виготовлення з них жароміцних конструкцій авіакосмічного призначення.

1. Удосконалено, в рамках синергетичного підходу Солнцева В.П. та ін., фізико-хімічні моделі високоенергетичних процесів синтезу інтерметалідів на конкретних прикладах їх отримання в системах Ti-Al та Ni - Al. Враховано вплив температурної залежності рівноважної концентрації тугоплавкого компонента в перитектичній рідині, процесу його кристалізації, порядку реакції та теплового випромінювання на характер термокінетичної траєкторії. На основі цих моделей, комп'ютерним експериментом оцінено вплив величин різних фізичних, фізико-хімічних та хімічних параметрів на якісні зміни кінетики температури процесу і концентрації тугоплавкого реакційного компонента. Відпрацьовано методики та написано програми для розрахунку величин максимальних температур розігріву системи, частоти термокінетичних коливань та якісного характеру термокінетики для пар значень параметрів моделі з різних діапазонів і побудовано відповідні поверхні одержаних за розрахунками результатів.

2. Показано, що у високотемпературних процесах синтезу інтерметалідів NiAl, TiAl, TiAl₂, TiAl₃, Ti₃Al домінуючу роль в теплообміні з зовнішнім середовищем, а також у швидкості досягнення системою теплової рівноваги відіграє процес переносу енергії за допомогою теплового випромінювання. Встановлено, що характер термокінетичної траєкторії визначається, головним чином, конкуренцією внутрішніх процесів, що відбуваються в системі. Показано, що в залежності від співвідношення швидкостей ендотермічного процесу розчинення тугоплавкого компонента та екзотермічної реакційної взаємодії і кристалізації в досліджуваних нерівноважних реакційних системах можуть існувати різні за характером термокінетичні траєкторії. Серед їх великого різновиду можливі тепловий вибух та термокінетичні коливання різного роду (періодичні, аперіодичні та нелінійні коливання).

3. Підтверджена, за допомогою експериментальних досліджень екзотермічних реакцій в порошкових реагуючих системах Ni-Al, Ti-Al, Ni-Ti, Ni-Sn, Cu-Ti, Cu-Sn, колективна природа процесів взаємодії, ініційованих контактним плавленням. Встановлено два механізми синтезу інтерметалідів, один з яких – це саморозповсюджувальний рух фронту реакції, а другий – детонація, за якої відбувається одночасно екзотермічний спалах у всьому об'ємі зразка. Може спостерігатися хвильове поширення тепла, що підтверджено асинхронною зміною температури за довжиною зразків, починаючи від поверхні нагріву. Показано, що при відсутності масопереносу, у випадку руху рідини, термокінетичні траєкторії реакційної системи в різних об'ємах зразка мають свій індивідуальний характер.

4. Виявлено, що на початковій стадії спікання зразки усіх досліджених в даній роботі порошкових подвійних систем густиною понад 80 % дають значний ріст

об'єму. Але з часом він сповільнюється і змінюється тенденцією до усадки, яка, як правило, з певного моменту часу припиняється. Це пов'язано з тим, що великі пори, які виникли при коагуляції численних менших, не зникають. Виникнення великих каверн пов'язано із реакційною кристалізацією інтерметалідів, що синтезуються. Показано, що введення певної кількості хімічно інертних домішок локалізує реакційні процеси в об'ємі пресовок і, таким чином, не дає змоги утвореним вакансіям збиратися у великі пори і каверни. Це подавляє ріст пресовок і приводить, з часом, до значної усадки. З'ясовано, що хоча усадка при спіканні залежить від якісного і кількісного складу порошкової системи, відносної густини сирих пресовок, температури і тривалості спікання, наявності різного роду домішок, але, в першу чергу, все визначається швидкістю, характером термодинамічної поведінки і тепловим ефектом реакційних процесів.

5. Розроблено за допомогою відпрацьованої технології реакційного спікання три жаростійкі дисперсно-зміцнені сплави на основі ніхрому Ni-20Cr з вмістом алюмінію до 6 % і оксиду ітрію (Y_2O_3) до 1,5%. Відпрацьовано режими прокатки з них товстих заготовок і тонких листів товщиною до 0,1 мм. Знайдено склади припоїв і відпрацьовано технологію терморекційної пайки для товстих заготовок розробленого сплаву складу Ni-20%Cr-3%Al-1,5% Y_2O_3 , з якого виготовлено макет кромки повітрозбірника гіперзвукового літака. Також відпрацьовано технологію терморекційної пайки тонкостінних листів зі сплаву складу Ni-20%Cr-5,95%Al-1,0% Y_2O_3 та виготовлено з нього макет теплозахисної стільникової панелі багаторазових космічних апаратів, який успішно пройшов випробування в аеродинамічному потоці розігрітому до 1200 °С, що відповідало піковим екстремальним умовам експлуатації.

6. Досліджено фізико-механічні і функціональні властивості розроблених дисперсно-зміцнених матеріалів. Виявлено, що ці сплави мають значну утомну міцність та жаростійкість. Усі властивості отриманих матеріалів забезпечують працездатність теплозахисних конструкцій багаторазових космічних систем при аеродинамічному нагріві до 1200 °С.

Отримані теоретичні та експериментальні дослідження можуть бути використані для створення основ термодинаміки реакційних процесів, ініційованих контактним плавленням, в порошкових реагуючих системах. Це дозволить вирішити проблему керування технологією реакційного спікання та одержання нового покоління металевих матеріалів з покращеними властивостями для роботи в екстремальних умовах експлуатації сучасної та перспективної авіакосмічної техніки багаторазового використання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

В яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Солнцев В.П. Разработка дисперсно-упрочненного порошкового сплава на основе нихрома и технологии изготовления из него макета металлической теплозащитной конструкции [Текст] / В.П. Солнцев, И.А. Гусарова, Г.А. Фролов,

Т.А. Солнцева, **К.Н. Петраш**, В.А. Назаренко, А.М. Потапов, А.Ф. Саленко, И.И. Деревянко, Т.А. Манько // Порошковая металлургия, №11/12. – Київ. – 2018. – С. 23-32.

Особистий внесок здобувача: експериментальне дослідження усадки і жаростійкості.

2. **Петраш К.Н.** Роль переноса тепла излучением в высокотемпературных реакционных процессах синтеза интерметаллида NiAl [Текст] / **К.Н. Петраш**, В.В. Скороход, В.П. Солнцев, Т.А. Солнцева // Порошковая металлургия №7/8. – Киев. – 2017. – С. 39-46.

Особистий внесок здобувача: введення в модель фактору теплового випромінювання та розробка програмного забезпечення, дослідження термокінетики.

3. Солнцев В.П. Термокинетика начальной стадии контактного плавления в перитектических системах с химическим соединением [Текст] / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, **К.Н. Петраш**, А.М. Шахновский // Современные проблемы физического материаловедения. Труды Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. Серия «Физико-химические основы технологии порошковых материалов», вып.22. – Киев. – 2013. – С. 181-185.

Особистий внесок здобувача: введення в математичну модель функціональної залежності рівноважної концентрації та розробка програмного забезпечення для рішення моделі і аналізу результатів.

4. Солнцев В.П. Коллективные механизмы и влияние температуры инициирования и внешней среды при СВС на термокинетическое поведение реакционной системы [Текст] / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, **К.Н. Петраш**, // Современные проблемы физического материаловедения. Труды Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. Серия «Физико-химические основы технологии порошковых материалов», вып.23 Киев. – 2014. – С. 155-159.

Особистий внесок здобувача: дослідження, в середовищі розробленого програмного забезпечення та MathCad, впливу різних значень керуючих параметрів на термокінетичну поведінку реакційної системи Ti-Al.

5. Солнцев В.П. Термокинетика реакционных процессов, инициированных контактным плавлением в порошковых металлических смесях на основе никеля с алюминием [Текст] / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, **К.Н. Петраш**, Т.А. Солнцева // Сборник научных трудов «Адгезия расплавов и пайка материалов», вып.47. – Киев. – 2014. – С. 25-34.

Особистий внесок здобувача: експериментально знято термокінетичні криві реакційної взаємодії.

6. Solntsev V. Development of rolling modes for samples made from nichrome powder alloy and their testing at operating temperatures [Текст] / V.Solntsev, G.Frolov, L.Kravchuk, V.Nazarenko, I.Bilan, **K.Petrash**, I.Husarova, F.Potapov // International scientific journal “Machines. Technologies material”. – Sofia. – 2017. – p. 254-257.

Особистий внесок здобувача: проведення технологічних досліджень.

7. **Петраш К.Н.** Термокинетика процессов взаимодействия в системе титан-алюминий вблизи температур скрытого максимума [Текст] / **К.Н. Петраш**, В.П. Солнцев, В.В. Скороход // Математические модели и вычислительный эксперимент

в материаловедении: Труды Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, вып.17. – Киев. – 2015. – С. 96-102.

Особистий внесок здобувача: введення в математичну модель члену, відповідального за розклад інтерметаліду, та проведення дослідження швидкості виходу процесів в стаціонарний режим.

8. **Петраш К.Н.** Анализ возможных вариантов развития термокинетики процессов взаимодействия в системе титан алюминий при динамическом изменении концентрации растворителя [Текст] / **К.Н. Петраш**, В.П. Солнцев, В.В. Скороход, Т.А. Солнцева // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении: Труды Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, 2016.- вып. 18. – Киев. – 2016. – С. 17-22.

Особистий внесок здобувача: врахування зміни концентрації розчинника та дослідження термодинаміки.

9. Солнцев В.П. Разработка жаропрочного сплава на основе ниобия для тепловой защиты изделий ракетно-космической техники [Текст] / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, Г.А. Фролов, **К.Н. Петраш**, Т.А. Солнцева, А.М. Потапов, И.А. Гусарова // Вестник двигателестроения, № 2. – Запорожье. – 2016. – С. 198-205.

Особистий внесок здобувача: дослідження жаростійкості ніобієвого сплаву.

10. **Петраш К.Н.** Теоретическое исследование влияния величины константы скорости реакции образования интерметаллидов на термокинетическое поведение реакционной порошковой системы Ti-Al [Текст] / **К.Н. Петраш**, В.П. Солнцев, Т.А. Солнцева // Современные проблемы физического материаловедения. Труды Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. Серия «Физико-химические основы технологии порошковых материалов», вып.25. – Киев. – 2016. – С. 98-104.

Особистий внесок здобувача: теоретичне дослідження термодинамічної поведінки при синтезі різних інтерметалідів в широкій області значень параметрів.

11. Гусарова І.О. Металеві матеріали для екстремальних умов експлуатації жаростійких конструкцій багаторазових літальних апаратів [Текст] / І.О.Гусарова, О.М.Потапов, В.П.Солнцев, Г.О.Фролов, **К.М. Петраш**, Т.А.Манько // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки», випуск № 58.–Луцьк. – 2017. –С.104-111.

Особистий внесок здобувача: дослідження процесів пресування і спікання композицій та жаростійкості отриманого сплаву.

12. Гусарова И.А. Разработка порошкового сплава на основе никрома и технологии изготовления жаростойких конструкций возвращаемых аэрокосмических аппаратов [Текст] / И.А. Гусарова, А.М. Потапов, В.П. Солнцев, Т.А. Солнцева, **К.Н. Петраш**, В.А. Назаренко, Г.А. Фролов, Т.А. Манько // Вестник Двигателестроения. – Запорожье. – 2017. – С. 158-163.

Особистий внесок здобувача: проведення термообробки та обробка даних після кожної технологічної операції.

13. **Петраш К.Н.** Моделирование термокинетики синтеза интерметаллидов в реакционной системе Ti-Al при переносе тепла за счет теплопроводности и излучения [Текст] / **К.Н. Петраш**, В.П. Солнцев, Т.А. Солнцева // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении: Труды Института

проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, - вып. 19. – Киев. – 2017. – С. 111-119.

Особистий внесок здобувача: дослідження фактору теплового випромінювання та аналіз термодинамічної поведінки.

14. **Петраш К.Н.** Влияние характера переноса тепла на термокинетические траектории процесов синтеза интерметаллидов NiAl_3 и Ni_3Al [Текст] / **К.Н. Петраш**, В.П. Солнцев, Т.А. Солнцева // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении: Труды Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, - вып. 20. – Киев. – 2018. – С. 110-114.

Особистий внесок здобувача: комп'ютерне дослідження термодинаміки.

Які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на конференціях:

15. Солнцев В.П. Моделирование термокинетических процессов инициированных контактным плавлением и растворением твердого компонента в жидком расплаве в перитектических системах с химическим соединением [Текст] / В.П. Солнцев, **К.Н. Петраш**, А.М. Шахновский // Матеріали Другої Міжнародної науково-технічної конференції «Обчислювальний інтелект (ОІ-2013)». – Черкаси. – 2013. – С. 424-425.

Особистий внесок здобувача: удосконалення моделі та її рішення засобами *MathCad*.

16. Солнцев В.П. К моделированию процессов контактного плавления в перитектических системах с химическим соединением [Текст] / В.П. Солнцев, **К.Н. Петраш**, А.М. Шахновский // Збірка тез доповідей V Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології. – Київ. – 2014. – С. 219.

Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення для дослідження і аналізу рішень математичної моделі.

17. Солнцев В.П. Особенности неравновесных процессов при реакционном спекании и их значение в повышении пластичности и других свойств порошковых материалов [Текст] / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, Т.А. Солнцева, **К.Н. Петраш** // Межд. Науч. чтения им. чл.-корр. РАН И.А.Одинга «Механические свойства современных конструкционных материалов». – Москва. – 2014. – С. 273-274.

Особистий внесок здобувача: експериментальне дослідження впливу дисперсно-зміцнюючих добавок на процес реакційного спікання.

18. Солнцев В.П. Особенности реакционного спекания композиций, содержащих тугоплавкий инертный компонент [Текст] / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, **К.Н. Петраш**, Т.А. Солнцева // Тр. IV Межд. конф. «Материаловедение тугоплавких соединений». – Киев. – 2014. – С. 38.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень кінетики спікання.

19. Солнцев В.П. Исследование термокинетики синтеза интерметаллидов на основе методов вычислительного эксперимента [Текст] / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, **К.Н. Петраш**, А.М. Шахновский // Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ-2014. – Киев. – 2014. – С. 172-177.

Особистий внесок здобувача: дослідження термокінетики синтеза за допомогою розробленого програмного забезпечення.

20. Солнцев В.П. О синергетическом механизме теплового взрыва при синтезе интерметаллидов [Текст] / В.П. Солнцев, А.М. Шахновский, **К.Н. Петраш**, В.В. Скороход // Труды XXVII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Саратов. – 2014. – С. 31-32.

Особистий внесок здобувача: дослідження області значень температур ініціювання і зовнішнього середовища, за яких можливий тепловий вибух.

21. **Петраш К.Н.** Компьютерное моделирование особенностей протекания процессов контактного плавления в перитектических системах с химическим соединением [Текст] / К.Н. Петраш, В.П. Солнцев // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції “Обчислювальний інтелект”. – Черкаси. – 2015. – С. 322-323.

Особистий внесок здобувача: встановлення особливостей протікання процесів контактного плавлення.

22. **Петраш К.Н.** Компьютерное моделирование термокинетического поведения реакционной системы в случае нелинейной аппроксимирующей функции в зависимости от растворения тугоплавкого компонента в расплаве [Текст] / К.Н. Петраш, В.П. Солнцев // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології», тези доповідей, Т.1. – Дніпропетровськ. – 2015. – С. 99-100.

Особистий внесок здобувача: дослідження особливостей протікання процесів з урахуванням нелінійної зміни рівноважної концентрації.

23. Солнцев В.П. Термокинетика реакционных процессов, инициированных контактным плавлением в порошковых металлических смесях на основе меди с титаном при наличии несмачиваемой добавки [Текст] / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, **К.Н. Петраш** // Матеріали V міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах». – Київ. – 2015. – С. 73-76.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментів по дослідженню впливу добавки фториду кальцію на процес спікання.

24. Солнцев В.П. Особенности термомеханической обработки дисперсноупрочненных нихромов и их свойства [Текст] / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, В.А. Назаренко, **К.Н. Петраш**, Н.П. Бродниковский, Ю.Ф. Луговской, Т.А. Солнцева // Международные Научные чтения им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механический свойства современных конструкционных материалов». – Москва. – 2016. – С. 119.

Особистий внесок здобувача: пресування та спікання зразків для дослідження властивостей ніхрому після термообробки.

25. Solntsev V.P. Current trends in creating a new generation of heat-resistant metal powder materials for thermal protection of reusable space [Текст] / V.P. Solntsev; V.V. Skorokhod; G.A. Frolov; **K.N. Petrash**, T.A. Solntseva; A.M. Potapov; I.A. Gusarova // Advanced composite materials: production, testing, applications | EMRS. – Warsaw. – 2016. – p. 47.

Особистий внесок здобувача: досліджено жаростійкість сплаву протягом 100 циклів при 1200 °C.

26. Солнцев В.П. Теоретические и экспериментальные исследования термокинетики синтеза интерметаллидов [Текст] / В.П. Солнцев, **К.Н. Петраш**, Т.А. Солнцева, В.В. Скороход // Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра». – Київ. – 2016. – С. 926-932.

Особистий внесок здобувача: введення в модель стехіометрії інтерметалічних сполук та дослідження термокінетики синтезу.

27. Солнцев В.П. Получение дисперсноупрочненных нихромов и особенности их термомеханической обработки [Текст] / В. П. Солнцев, В.А. Назаренко, **К.Н. Петраш**, Г.А. Фролов, Т.А. Солнцева, В.С. Воропаев, А.Д. Костенко, И.А. Гусарова, А.М. Потапов // Материалы 6-й международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее». – Днепр. – 2017. – С. 78.

Особистий внесок здобувача: приготування порошкових композицій, пресування їх в заготовки та обробка отриманих результатів.

28. Husarova I. Dispersion reinforced alloys for operation under extreme conditions of high temperature plasma [Текст] / I. Husarova, V. Solntsev, A. Potapov, T. Solntseva, **К. Petrash**, G. Frolov // JRC conference and workshop reports “Materials resistant to extreme conditions for future energy systems”. – Kyiv. – 2017. – p. 60.

Особистий внесок здобувача: проведення досліджень циклічної жаростійкості та обробка результатів.

29. **Петраш К.Н.** Синергетическая модель синтеза интерметаллидов и влияние характера переноса тепла на термокинетическую траекторию процесса [Текст] / **К.Н. Петраш**, В.П. Солнцев, Т.А. Солнцева // Матеріали XI Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів». – Київ. – 2018. – С. 259-261.

Особистий внесок здобувача: введення в модель фактору теплового випромінювання та написання програми для її рішення і аналізу результатів.

30. **Петраш К.М.** Прикладні застосування інтелектуальних обчислень у вивченні реакційних процесів синтезу інтерметалідів в рамках синергетичного підходу [Текст] / **К.М. Петраш**, В.П. Солнцев, Т.О. Солнцева // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Обчислювальний інтелект». – Ужгород. – 2019. – С. 263-264.

Особистий внесок здобувача: Дослідження термокінетики реакційних процесів в системі Ti-Al комп'ютерними засобами.

31. Solntsev V.P. Dispersion Strengthened by the Yttrium Nanoxide Nickel Alloys, Technology Features and Properties [Текст] / V.P Solntsev., V.A. Nazarenko, T.O. Solntseva, **К.М. Petrash**, Y.F. Lugovskoi, M.P. Brodnikovskiy, M.V. Minakov // Матеріали конференції «Функціональні матеріали для інноваційної енергетики». – Київ. – 2019. – с. 90.

Особистий внесок здобувача: Пресування заготовок та проведення реакційного спікання дисперсно-зміцнених нанооксидом ітрію нікелевих сплавів.

32. **Petrash K.** Modern trends in the development of heat resistant nickel alloys and technologies of manufacturing of heat-protective structures for shuttlecrafts [Текст] / **К. Petrash**, V. Solntsev, M. Shtern, T. Solntseva, V. Nazarenko, M. Brodnikovskiy, Y.

Lugovskoi // 7th International conference "Space technologies: present and future". – Dnipro. – 2019. – p. 168.

Особистий внесок здобувача: Відпрацювання режимів реакційного спікання та дослідження жаростійкості матеріалу.

Які додатково відображають наукові результати дисертації:

33. Патент на корисну модель № 115259 Україна, МПК С22С 19/05. Спосіб одержання жаростійкого сплаву / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, Т.О. Солнцева, **К.М. Петраш**, Г.О. Фролов, І.О. Гусарова, О.М. Потапов, Ю.М. Литвиненко, заявник і патентовласник Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України - № u201610602; заявлено 20.10.2016; опубл. 10.04.2017, Бюл.№ 7.

АНОТАЦІЯ

Петраш К. М. Закономірності керованого реакційного спікання, процесів структуроутворення та формування властивостей жаростійких сплавів на основі нікелю. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.06 «Порошкова металургія та композиційні матеріали (13 Механічна інженерія). – Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, 2019. Спеціалізована Вчена рада Д 26.207.03.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-технічної задачі встановлення закономірностей реакційного спікання металічних композицій, які містять невзаємодіючі сполуки, та розробці жаростійких дисперсно-зміцнених ніхромів і технології одержання виробів з них.

Вперше, на основі теоретичного аналізу з урахуванням колективних взаємодій в реакційних системах Ni-Al і Ti-Al, ґрунтуючись на уявленні проточного реактора побудовані термодинамічні моделі необоротних процесів, ініційованих контактним плавленням компонентів. Встановлено різного роду термодинамічні траєкторії розвитку процесу взаємодії. Виявлено, що особливо важливу роль в передачі енергії відіграє теплове випромінювання. Це дозволило ефективно застосувати безпосередній термічний аналіз для реагуючих сумішей.

Вивчено експериментальну термодинаміку реагуючих систем (Ni-Al, Ti-Al, Ni-Ti, Ni-Sn, Cu-Ti, Cu-Sn), які є основою промислових сплавів. Показано, що поведінка цих систем характеризується складною немонотонною змінною температури і має режими теплового вибуху та самопоширюваного високотемпературного синтезу. Така термодинамічна поведінка підтверджує синергетичний характер реакційної взаємодії, як і було показано при моделюванні цих процесів. Це стало основою експериментального вивчення закономірностей спікання.

Аналіз кривих усадки та порівняння відносної густини сирих і спечених порошкових заготовок з металевих сумішей показав, що процес реакційного спікання ініціюється разом з появою перитектичної чи евтектичної рідини. Виявлено, що зразки практично усіх досліджених порошкових подвійних систем з відносною густиною понад 80 % дають значний ріст об'єму в процесі спікання. Проте введення певної кількості хімічно інертних домішок локалізує реакційні

процеси по всьому об'єму пресовок і не дає змоги дрібним порам збиратися в каверни. Це сприяє сповільненню росту пресовок і, з часом, приводить до значної усадки. Дрібні пори в кожному з малих локальних об'ємів беруть участь у масопереносі і забезпечують ущільнення на пізніх стадіях спікання.

Розроблено із застосуванням реакційного спікання жаростійкі дисперсно-зміцнені сплави на основі ніхрому з вмістом алюмінію до 6 % і оксиду ітрію (Y_2O_3) до 1,5% та відпрацьовано технології отримання виробів з них. Зокрема, режими прокатки товстих заготовок і тонких листів товщиною до 0,1 мм. Розроблено склади припоїв та умови терморекційної пайки для товстих заготовок, що використовуються при виготовленні повітрязабірника гіперзвукового літака. Також відпрацьовано режими пайки та інші технологічні операції для виготовлення теплозахисних панелей гіперзвукових і багаторазових космічних апаратів.

Отримані фізико-механічні та функціональні властивості дисперсно-зміцнених ніхромів забезпечують в сукупності необхідну працездатність багаторазових космічних систем за температур до 1200 °С.

Ключові слова: синергетична модель, термокінетика, реакційне спікання, самопоширюваний високотемпературний синтез, тепловий вибух, інтерметаліди, дисперсно-зміцнені ніхроми, жаростійкість, жароміцність, утомна міцність.

АННОТАЦІЯ

Петраш К. Н. Закономерности управляемого реакционного спекания, процессов структурообразования и формирования свойств жаростойких сплавов на основе никеля. Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на получения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы» (13 Механическая инженерия). – Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, 2019. Специализированный Ученый совет Д 26.207.03.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической задачи установления закономерностей реакционного спекания металлических композиций, содержащих не взаимодействующие соединения, разработке жаростойких дисперсно-упрочненных нихромов и технологии получения изделий с них.

Впервые, на основе теоретического анализа с учетом коллективных взаимодействий в реакционных системах Ni-Al и Ti-Al, основываясь на представлении проточного реактора, построены термокинетические модели необратимых процессов, инициированных контактным плавлением компонентов. Установлено различные термокинетические траектории развития процесса взаимодействия. Выявлено, что особенно важную роль в передаче энергии играет тепловое излучение. Это позволило эффективно использовать непосредственный термический анализ для реагирующих смесей.

Изучено экспериментальную термокинетическую реакцию реагирующих систем (Ni-Al, Ti-Al, Ni-Ti, Ni-Sn, Cu-Ti, Cu-Sn), которые являются основой промышленных сплавов. Показано, что поведение этих систем характеризуется сложным немонотонным изменением температуры и имеет режимы теплового взрыва, а также

самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Такое термокинетическое поведение подтверждает синергетический характер реакционного взаимодействия, как и показано при моделировании этих процессов. Это стало основой экспериментального изучения закономерностей спекания.

Анализ кривых усадки и сравнение относительной плотности сырых и спеченных порошковых заготовок металлических смесей показал, что процесс реакционного спекания инициируется вместе с появлением перитектической или эвтектической жидкости. Выявлено, что образцы практически всех исследованных порошковых двойных систем с относительной плотностью более 80 % дают значительный рост объема в процессе спекания. Однако, введение определенного количества химически инертных добавок локализует реакционные процессы во всем объеме прессовок и не дает возможности мелким порам собираться в каверны. Это содействует замедлению роста пресовок и, со временем, приводит к значительной усадке. Мелкие поры в каждом малом локальном объеме участвуют в массопереносе и создают условия для прохождения процесса уплотнения на поздних стадиях спекания.

Разработано с использованием реакционного спекания жаростойкие дисперсно-упрочненные сплавы на основе нихрома с содержанием алюминия до 6 % и оксида иттрия (Y_2O_3) до 5 %, а также отработаны технологии получения изделий с них. В частности, режимы прокатки толстых заготовок и тонких листов толщиной до 0,1 мм. Разработаны составы припоев и условия термореакционной пайки для толстых заготовок, что используются при изготовлении воздухозаборника гиперзвукового самолета. Также отработаны режимы пайки и другие технологические операции для изготовления теплозащитных панелей гиперзвуковых и многоразовых космических аппаратов.

Исследованные физико-механические и функциональные свойства дисперсно-упрочненных нихромов обеспечивают, в совокупности, необходимую работоспособность многоразовых космических систем при температурах до 1200 °С.

Ключевые слова: синергетическая модель, термокинетика, реакционное спекание, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, тепловой взрыв, интерметаллиды, дисперсно-упрочненные нихромы, жаростойкость, жаропрочность, усталостная прочность.

SUMMARY

Petrash K. M. Regularities of controlled reaction sintering, structure formation processes and formation of properties of heat-resistant nickel-based alloys. – The qualification scientific work presented as a manuscript.

The thesis for candidate degree of technical science on specialty 05.16.06 “Powder metallurgy and composite materials” (13 Mechanical engineering). – Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences, NAS of Ukraine, Kyiv, 2019. Specialized Academic Council D 26.207.03.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and technical problem of establishing the regularity of the reaction sintering of metal compositions that contain

non-interacting compounds, and the development of heat-resisting dispersion-hardened nichrome and the technology of obtaining products of them.

For the first time, thermokinetic models of irreversible processes initiated by contact melting of components based on theoretical analysis taking into account collective interactions in the Ni-Al and Ti-Al reaction systems of and the representation of the flow reactor were constructed.

Different kinds of thermokinetic trajectories of interaction process development were established. It was revealed that thermal radiation plays a particularly important role in the transmission of energy, which made it possible to effectively apply a direct thermal analysis for reacting mixtures.

The experimental thermokinetics of reacting systems (Ni-Al, Ti-Al, Ni-Ti, Ni-Sn, Cu-Ti, Cu-Sn), which are the basis of industrial alloys were studied.

It is shown that the behavior of these systems is characterized by a complex non-monotonic change in temperature and occurs in the regimes of thermal explosion and self-propagating high-temperature synthesis.

Such thermokinetic behavior confirms the synergistic nature of the reaction interaction, as was shown in the simulation of these processes. This became the basis of the experimental study of the regularities of sintering.

The analysis of shrinkage curves and the comparison of the relative density of raw and sintered powder blanks from metal mixtures showed that the reaction sintering process is initiated (along) with the appearance of a peritectic or eutectic fluid.

It has been found that samples of almost all investigated powder double systems with a relative density of more than 80% give a significant increase in volume during the sintering process.

However, the introduction of a certain amount of chemically inert impurities localizes the reaction processes throughout the volume of the presses and prevents small pores from being coagulated into cavities.

This contributes to the slowing of the growth of the raw powder blanks and, eventually, leads to significant shrinkage. Small pores in each small local volume take part in the mass transfer and activate the shrinkage process in the late stages of sintering.

Heat-resistant dispersion-hardened alloys based on nichrome with an aluminum content of up to 6% and yttrium oxide (Y_2O_3) up to 1,5% were developed using reaction sintering, as well as developed technologies for producing products from them, in particular, the modes of rolling thick billets and thin sheets with a thickness of up to 0.1 mm.

Solder compositions and thermo-reaction soldering conditions for thick blanks were developed, which are used in the manufacture of the air intake of a hypersonic aircraft. Soldering regimes and other technological operations for the manufacture of heat-protective panels for hypersonic and reusable spacecraft were also worked out.

The obtained physical-mechanical and functional properties of dispersion-strengthened nichromes provide in aggregate the necessary performance of reusable space systems at the temperatures up to 1200 °C.

Key words: synergetic model, thermokinetics, reacting sintering, self-propagating high-temperature synthesis, thermal explosion, intermetallics, dispersed-strengthened nichroms, heat resistance, refractory, fatigue strength.

Підписано до друку 04.12.2019 Формат 60×90 1/16.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 2. Наклад 100 прим. Зам. № ДЖ-434 від 10.12.2019

Друк ТОВ “ДІДЖІТАЛ ДРІМС”
03142, Київ, бул. Вернадського, 67, оф. 40, тел.: (044) 456-13-81