БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО КАТАЛИЗ

АНАЛИЗ НА СВОЙСТВАТА НА КАНДИДАТ-МАТЕРИАЛИ, ПРЕДВИДЕНИ ЗА ЕКСПЛОАТАЦИЯ В ДИНАМИЧНИ РАДИАЦИОННИ И КОРОЗИОННИ УСЛОВИЯ

Справка за научните приноси

на гл. ас. д-р Евгени Петров Попов
лаб. Дизайн и охарактеризиране на каталитичните материали

Институт по катализ

Българска Академия на Науките

за участие в конкурс за заемане на академична длъжност „**Доцент**“ по област на висше образование „4. Природни науки, математика и информатика“, професионално направление „4.2. Химически науки“, научна специалност „Химия на твърдото тяло“ (01.05.18), тематично направление „**Анализ на свойствата на кандидат-материали, предвидени за експлоатация в динамични радиационни и корозионни условия**“ в Институт по катализ – БАН, София, обявен в **Държавен вестник бр. 58, стр. 190 от 26. 06. 2026 г.**

СОФИЯ, 2026

Кандидатът има съавторство в 59 публикационни труда, към които има 357 цитирания, видим в SCOPUS: (https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57206166347). От тези работи за участие в конкурса са използвани общо **19 научни труда**, **18 публикации** издадени в международни реферирани издания с импакт-фактор (16 от тях са в Q1, 1 в Q2 и 1 в Q4) и **1 публикация** публикувана в издание без импакт-фактор. Тези трудовете са **цитирани 84 пъти без автоцитати** на всички автори. Индексът на Хирш (H) на кандидата въз основа на всички публикувани трудове, включени в базата данни на ISI е 10 (Scopus).

Хабилитационната справка включва 8 научни публикации (*публикации от В1 до В8*), като еквивалентен брой статии за хабилитационен труд, тематично обединяващи изследвания чрез научно-инженерни подходи и спектрометрични методи при изучаване и анализ на свойствата на кандидат-материали, предвидени за експлоатация в динамичен радиационен и корозионен режим на работа.

Справката от основните научни приноси на изследователската работа извън хабилитационния труд е направена върху 11 научни публикации (*публикации от Г1 до Г11*), които тематично са обединени в следните направления:

- Радиационни материали;

- Корозионни материали.

Цитираните статии са обозначени с индексите „В“ и „Г“ спрямо критериите за изготвяне на подробната справка. По показател „В“ са представени научните публикации, участващи в конкурса като еквивалентен брой статии за хабилитационен труд. Публикации участващи в конкурса по група от показатели Г, отговарят на статиите, които не са включени в хабилитационния труд. Използваните научни трудове не са представяни в други конкурси за заемане на академични длъжности и придобиване на научни степени.

СЪДЪРЖАНИЕ:

1. ХАБИЛИТАЦИОННА СПРАВКА ОТГОВАРЯЩА НА ЕКВИВАЛЕНТЕН БРОЙ СТАТИИ ЗА ХАБИЛИТАЦИОНЕН ТРУД, КОИТО СА РЕФЕРИРАНИ И ИНДЕКСИРАНИ В СВЕТОВНОИЗВЕСТНИ БАЗИ ДАННИ С НАУЧНА ИНФОРМАЦИЯ (WEB OF SCIENCE И SCOPUS) – ПОКАЗАТЕЛ В 4

1.1. Въведение 4

1.2. Анализ на радиационни дефекти при облъчване с йони в материали за реакторни и космически цели 5

1.3. Анализ на радиационни дефекти при гама облъчване в материали за реакторни и космически цели 8

1.4. Инженерен подход при адаптация на криогенен прибор за изследване, на структорни и магнитни фазови преходи, чрез неутронна дифракция 9

1.5. Обобщени приноси на научните трудове включени в хабилитационната справка 10

2. АВТОРСКА СПРАВКА НА НАУЧНИТЕ ПУБЛИКАЦИИ В ИЗДАНИЯ, КОИТО СА РЕФЕРИРАНИ И ИНДЕКСИРАНИ В (WEB OF SCIENCE И SCOPUS), ИЗВЪН ХАБИЛИТАЦИОННИЯ ТРУД – ПОКАЗАТЕЛ Г 12

2.1. Радиационни материали 12

2.2. Корозионни материали 17

3. ПУБЛИКАЦИИ 20

3.1. „В“ – Научни публикации включени в хабилитационната справка 20

3.2. „Г”–Научни публикации, включени в извън хабилитационната справка 21

1. ХАБИЛИТАЦИОННА СПРАВКА ОТГОВАРЯЩА НА ЕКВИВАЛЕНТЕН БРОЙ СТАТИИ ЗА ХАБИЛИТАЦИОНЕН ТРУД, КОИТО СА РЕФЕРИРАНИ И ИНДЕКСИРАНИ В СВЕТОВНОИЗВЕСТНИ БАЗИ ДАННИ С НАУЧНА ИНФОРМАЦИЯ (WEB OF SCIENCE И SCOPUS) – ПОКАЗАТЕЛ В

Хабилитационната справка включва публикации В1 – В8, като в 2 от тях участникът в конкурса е посочен като първи автор, в 1 като автор за кореспонденция, в 2 като втори автор и в 1 като последен автор, отговарящ на позицията проектен ръководител на конкретната публикационна работа. В тези научни трудове са описани основно проучвания свързани с анализ на устойчивостта на стратегически материали, явяващи се кандидати за приложение в екплоатационни условия за реакторни и космически нужди, изследвани по методите на позитронната спектроскопия. В една от работите е представен инженерен подход при адаптация на криогенен прибор за изследване, на структорни и магнитни фазови преходи, чрез неутронна дифракция, при ниски температури. Тези изследвания са заложени в настоящият хабилитационният труд и са проведени от гл. ас. д-р Евгени Попов.

1.1. Въведение

Развитието на съвременните високотехнологични направления, включително ядрената енергетика от Поколение IV, проекти за термоядрен синтез (като международния реактор ITER) и дълбококосмическите мисии, поставя безпрецедентни изисквания към структурните и защитните материали. Работата на тези системи е свързана с експлоатация в екстремни условия, характеризиращи се с критични термични натоварвания, химическа агресивност на средите и интензивни радиационни полета. Проектирането на надеждна радиационна защита за електронни компоненти и пилотирани модули в космоса, както и на първа стена (бланкети) в термоядрените реактори, изисква внедряването на нови класове материали с изключителна радиационна толерантност и структурна стабилност.

В тези високотехнологични сектори материалите са подложени на постоянно бомбардиране от широк спектър йонизиращи лъчения. В ядрените и термоядрените системи деградацията на свойствата се предизвиква от високоенергийни 14 MeV неутрони, хелиеви ядра и бързи тежки йони (SHI), които взаимодействат с плазмено-фокусираните материали (PFM). Паралелно с това, в космическото пространство конструктивните елементи са изложени на галактически космически лъчи (GCR) и слънчеви протонни събития (SPE). Общ и изключително критичен деструктивен фактор и в двете направления е високоинтензивното обемно гама-лъчение. Гама-фотоните генерират напрежения и дефекти (атомни измествания) в целия обем на материалите чрез механизмите на Комптоново разсейване и фотоефект. Това води до образуване на

ваканции, клъстери и трансмутационни изменения, които нарушават хетерогенността на структурата, влошават механичните свойства и понижават топлопроводимостта.

За преодоляване на тези проблеми научният интерес е насочен към свръхвисокотемпературната керамика и наноструктурираните покрития.

Ефективното им прилагане обаче изисква детайлно фундаментално разбиране на микроструктурната еволюция на дефектите под влияние на абсорбираната радиационна доза и термичната обработка.

При всички случаи комплексната работа на множество научни групи, изисква серия от инженерни решения, нуждата от които се появява в хода на конкретната изследователска работа.

В този труд, са комбинирани анализите от няколко публикации обхващащи изследвания върху 7 конкретни кандидата за радиационни материали, предвиждащи се за експлоатация в динамичен радиационен режим. Представени са резултати за структурната еволюция при облъчване. За да се задълбочи разбирането на структурните свойства, на изследваните материали се използват предимствата на няколко метода: позитронно-анихилационната спектроскопия, неутронна дифракция, рентгенова дифракция, Раман и др.. В изследванията на радиационно-устойчиви материали решаващата роля, играе насочването на усилията за разработване на нови инженерни подходи.

Основните научни приноси на изследователската работа в хабилитационния труд могат да бъдат обобщени тематично в следните направления:

- Анализ на радиационни дефекти при облъчване с йони в материали за реакторни и космически цели [B1, B4, B5, B6, B7].
- Анализ на радиационни дефекти при гама облъчване в материали за реакторни и космически цели [B2, B3].
- Инженерен подход при адаптация на криогенен прибор за изследване, на структурни и магнитни фазови преходи, чрез неутронна дифракция [B8].

1.2. Анализ на радиационни дефекти при облъчване с йони в материали за реакторни и космически цели

Изследванията за тантал (Ta/W) и желязо-хром (Fe-Cr) системи, разгледани в работи [B1] и [B7] позволяват формулирането на цялостна картина за радиационната устойчивост на конкретни материалите за ITER:

• Оптимизация на материалите: Докато за компонентите, изложени на водна корозия (като неутронни мишени), се предлага волфрам (W), облицован с тантал (Ta), то за структурните елементи на първата стена перспективен кандидат е желязо-хромовата сплав с 11% Cr.

• Универсално влияние на примеси в дефекти H, He: И в двете системи Ta и Fe-Cr облъчването с протони и неутрони генерира водород H и хелий He. Тяхната абсорбция в микрокухините и ваканционните клъстери предизвиква нискотемпературна крехкост и структурна деградация.

• Позитронна спектроскопия като общ аналитичен инструмент: Чрез двукомпонентната теория на функционала на плътността (TCDFT) се моделира времето на живот на позитроните (PLT) и електронният импулс (CDB). Методът улавя с висока чувствителност дефектите и в двете системи:

◦ При Ta: PLT нараства от 118.3 ps (чист метал) до ~400 ps (насищане на клъстери), като абсорбцията на He свива времето по-силно от H_2).

◦ При Fe-Cr: PLT и електронният импулс ясно корелират с размера на ваканциите, съотношението на H/He атомите и процента на хрома в матрицата.

В научен труд [B4] са изследвани възможностите за in situ синтероване на W_2B и неговото поведение след облъчване с леки йони. Тъй като екстремните радиационни условия в термоядрените реактори влошават термомеханичните свойства на волфрама (W), за повишаване на устойчивостта му се прилага легиране.

Сериозен интерес предизвикват високоентропийните сплави (HEA) на базата на W. Системите $W_x(Ta,V,Cr,Ti)_y$ проявяват механизъм за самовъзстановяване и отлична повърхностна стабилност при облъчване с He^+. При енергия 200 keV сплавта $W_{0.5}(Ta,V,Cr,Ti)_{0.5}$ повишава твърдостта си с 3.3 GPa спрямо чистия W, като формира само прекурсори на мехурчета и дислокации. Кватернерните системи без Ti (W-[Ta,V,Cr]) показват изключителна устойчивост при бомбардиране с тежки йони (Kr^+, Cu^+) и минимално радиационно втвърдяване. Добавянето на 4 wt % Ti пък оптимизира относителната плътност и твърдостта на матрицата.

Ефективен метод е и карбидното легиране (CDS-W), където титановият карбид (TiC) се откроява с висока твърдост, термостабилност и запазване на електропроводимостта на матрицата. При нискоенергийно облъчване с He^+ (250 eV, 600 °C) втората фаза от TiC засилва повърхностното наноструктуриране с пори. От друга страна, сплавта W-TiC (1.1 wt %) показва повишена устойчивост срещу дефекти при облъчване с 1 MeV Kr^+ (при стайна температура и 1173 °C) поради рекомбинация на радиационните дефекти. Освен това, при високоенергийни He^+ йони (3 MeV), системите с 0.25–0.8 wt % TiC демонстрират до 10 пъти по-добра устойчивост на повърхностни повреди от чистия W.

Това доказва, че при определени условия еволюцията на ранните радиационни дефекти може да предизвика положителен микроструктурен ефект.

Ново направление е комбинирането на W, B_4C, TiC и въглерод като прекурсори чрез механично легиране (МЛ) и синтероване при 1750 °C, водещо до композитната система WC-WB-W_2B. Волфрамовите бориди (W_xB_y) са трудни за производство в монолитен вид, но съчетават високи твърдост, топлопроводимост и затихване на неутрони и гама-лъчи, което ги прави отлични материали за радиационна защита. Сред експериментално стабилните фази ди-волфрамовият борид (W_2B) е най-термодинамично устойчив при високи температури, но до момента липсват експериментални данни за неговото радиационно поведение. Настоящото изследване запълва тази празнина, като оценява структурните повреди в МЛ-получен W_2B (~98%) от прекурсори W–6wt%B_4C–2wt%TiC–1wt%C. Материалът е подложен на облъчване с 2.5 MeV He^+ йони до висок флуенс от 5.0×10^{20} йона/cm^2. Радиационните дефекти и процесите на синтероване са анализирани чрез рентгенова дифракция (Rietveld), Раманова спектроскопия, SRIM симулации и позитронно-анихилационна спектроскопия (PALS) за изготвяне на подробна експериментално-числена карта на дефектите.

В друг научен труд [B6] е изследвано облъчването на B_4C с леки и тежки йони за целите на Международния термоядрен експериментален реактор (ITER), където материалът се разглежда като потенциален компонент за първата стена и дивертора. При in situ синтероване на волфрамови бориди (W_2B, W_5B_2, WB_2) от нанопрахове на W и B_4C, в зоните с недостатъчна температура остават фази от чист B_4C. Тези зони са подложени на интензивно облъчване от деутерий (D), тритий (T), хелий (He) и неутрони, както и на вторична йонизация от избити атоми. Докато ефектите от леките йони разкриват част от дефектообразуването, тежките йони моделират реалните повреди от вторичната йонизация. Експериментално B4C е облъчен с високоенергийни тежки йони $^{132}Xe^{26+}$ до флуенс от 3.83×10^{14} йона/cm^2 при стайна температура. Структурните промени са анализирани чрез рентгенова дифракция (XRD), а еволюцията на дефектите при имплантиране на водород и хелий е прогнозирана чрез изчисления на времето на живот на позитроните (τ). XRD анализите показват нарастване на решетъчните параметри поради запълване на клетките на субстрата, както и частично аморфизиране на структурата. Наблюдаваната фрагментация на зърната след облъчване се оценява като благоприятен фактор за последващото естествено синтероване на базовите компоненти в реактора. Минималната промяна в електронната плътност при нарастване на обемните дефекти потвърждава добрата радиационна устойчивост на B_4C и неговата приложимост в термоядрени системи. Легирането с боров карбид (B_4C), който съчетава висока твърдост и химическа стабилност с отлична ефективност при поглъщането на неутрони, се явява перспективна алтернатива.

В научна работа [B5] е изследвано поведението на търговския карбид Widia-N (WC-6Co) при облъчване с ^{132}Xe йони (167 MeV). Резултатите показват, че натрупаната енергия причинява структурна еволюция по различни начини на повърхността и в обема:

- Повърхностни изменения (Раманова спектроскопия): Наблюдава се разкъсване на W-O връзките (деоксидация), немонотонна промяна в размера на въглеродните клъстери и улеснено проникване на атмосферен N_2 във въглеродната матрица. Преминаването на праговия флуенс от 10^{13} йона/cm² води до пълна аморфизация на откритата графитоподобна фаза. Поради по-големия си обем, атомите на W се изместват по-лесно от Xe йоните в сравнение с C и Co, което задейства появата на нови, богати на въглерод фази (WC_2, W_2C_5) или вторични фази с кобалт WC_2+x wt% Co при x > 6).

- Обемни изменения (XRD, ND и PALS): Дифракционните методи (XRD и ND) потвърждават, че основната фаза δ-WC остава стабилна без общ фазов преход в обема, но вътрешното напрежение на натиск нараства постоянно с дозата. Индуцираните точкови дефекти се реорганизират в дислокации, главно във въглеродната подрешетка. Данните от позитронната анихилация (PALS) разкриват, че захващането на позитрони става в малки ваканционни клъстери (с поне една метална ваканция) и по зърнените граници, като при най-високите флуенси се доказва генерирането на нови зърнени граници.

1.3. Анализ на радиационни дефекти при гама облъчване в материали за реакторни и космически цели

В експлоатационните режими, предвидени за изследваните от нас материали, като продукт от реакциите, имаме активно гама лъчение. По тази причина, при анализ на материалите, трябва да се отдели специално внимание на ефектите, които предизвиква гама облъчването в изследваните сруктури.

В работата [B2] се разглежда ZrB_2 като възможен кандидат за материал за бланкети на термоядрен реактор. Свойствата на ZrB_2 включват: висока електрическа и топлопроводимост, устойчивост на химическо и механично износване, устойчивост на химическа и радиационна корозия и висока температура на топене. Те го правят изключително подходящ материал за експлоатация в екстремни условия. Възможно е приложението му както за експолоатация в ядрени (термоядрени) реактори, така и при нуждите на космически апарати. Поставяме основна цел - изследване на ZrB_2 и анализ за експлоатация в условия на радиационно натоварване. За целта на изследването се използват методите на позитронната спектроскопия, чрез експеримент и моделиране. Основен механизъм за образуване на дефекти е атомни измествания генерирани чрез гама-разсейване на Комптън или фотоефект. Един от важните въпроси е количеството на дефектите индуцирани чрез облъчване на материала.

За целите на изследването ZrB_2 е изложен на гама-облъчване с енергия 1.3 MeV при различни дози на абсорбция. При анализа са използвани методи на Доплерово разширяване и позитронно-анихилационна спектроскопия за време на живот (PALS).

Наличието на гама-облъчване в неотгряти проби причинява образуването на циркониеви моноваканции и разширяването на ваканционните клъстери. Отгряването допълнително трансформира материала, реорганизирайки точковите дефекти или миграция на монодефекти в клъстери и към повърхностни области. Интензитетът на основното време на живот (τ_1) намалява при тези условия. Отгрятите проби достигат стехиометрично равновесие, но функционалните им свойства, заради които материалът се предлага за кандидат се загубват след последната доза гама-облъчване. При максимална доза на гама облъчване, се наблюдава увеличаване на интензивността от анихилация с позитроний.

Друг възможен кандидат за експлоятация в екстремални услови е разгледан в работа [B3]. Поради изключителната си температурна и химическа стабилност, ниско триене, корозионна устойчивост и висока твърдост (около 37 GPa / 1800–2100 HV), TiN намира широко приложение в аерокосмическата индустрия, автомобилостроенето, електрониката и ядрения сектор.

Тъй като структурните дефекти, индуцирани от гама-фотони в тези керамични съединения, са слабо проучени, целта на настоящото изследване е да се анализира еволюцията на дефектите в TiN наночастици. За целта са приложени методите на Доплерово разширяване и позитронно-анихилационна спектроскопия за време на живот (PALS). Изследвано е и влиянието на отгряване при 1373 K с 24-часов температурен цикъл преди и след облъчване.

При изследването на материала, беше открито че, с дозата наситеността на титаниеви моноваканции се замества от ваканционни клъстери включващи титаниева + азотна ваканции. В същото време се увеличава концентрацията и обема на големите ваканционни клъстери. При висока доза може да се отбележи обща миграция на големи ваканционни клъстери към повърхността на зърното. Предвидената функционалност на конкретния материал при изследваните от нас условия е при доза до 3000 kGy.

1.4. Инженерен подход при адаптация на криогенен прибор за изследване, на структурни и магнитни фазови преходи, чрез неутронна дифракция

В работа [B8] е представен чисто практичен момент при експериментални действия, обсъждащи конкретни измервателни прибори. Макар тази работа на пръв поглед да изглежда далеч от предварително зададеното хабилитационно направление — радиационни материали, в много случаи при решаването на комплексни задачи, каквито се индуцират стандартно при мега проекти, решенията произтичат от съвкупност от вече генерирани инженерни подобрения предназначени за различен тип нужди от

целенасочените. По тази причина би следвало да имаме предвид страничните възможности, които разкрива, чрез своите способности конкретният кандидат.

При провеждане на експерименти по неутронна дифракция, при ниски температури, се появи необходимост от подобрение на настоящата охладителна експериментална конструкция. Докладвани са тестовите измервания, които отчетоха задоволителни резултати. Изследвани са проби $HoFeO_3$, и са отчетени магнитни фазови преходи в реално време.

В следствие на техническата работа, *б*еше разработен ефикасен криостат за нуждите на неутронно-дифракционните измервания при ниски температури, като температурата на образеца беще задържана продължително под 2K.

1.5. Обобщени приноси на научните трудове включени в хабилитационната справка

- Анализирани са своиствата и радиационната издържливост на конкретни кандидати (7 материала), предвидени за експлоатация при натоварен радиационен режим.

- Кандидатите тантал (Ta/W - волфрам, облицован с тантал) и желязо-хром (Fe-Cr) се представят като подходящи, както следва - за компонентите, изложени на водна корозия и за структурните елементи на първата стена.

- Композит, в съотношение $W–6wt\%B_4C–2wt\%TiC–1wt\%C$, предвиден за in situ синтероване при дивертора в ITER, е изследван след синтировъчния процес при облъчване с леки йони, с което се потвърждава неговата ефективност.

- Предвиденият като легировъчен прекурсор B4C, доказва своята уникалност, при облъчване с леки и тежки йони.

- Widia-N (WC-6Co), въпреки неговите безусловни качества, при динамичен работен режим има определени недостатъци, които го правят трудно приложим в радиационна, реакторна среда, но същите не се явяват бариера при прилагането му в други сфери, като например за космически прибори.

- Определени са максималните дози гама облъчване при които двата нови кандидата ZrB_2 и TiN съхраняват своята функционалност.

- Представена е възможност за инженерна рационализация, в помощ на експерименталните методи.

Основен принос, който може да се изтъкне е работата с дефекти и анализирането на структурните особености на материалите при разнообразни начални условия. Определянето на ваканционната населеност в образците и вида на конкретните ваканционни клъстери. Анализиране на химичните свойства на дефектите и каталитичната им способност към конкретния материал, приложен в определена ситуация. В тази връзка Би следвало да се отбележи, че дефинирането на обемни кислородни ваканции в оксидни

съединения би бил съществен принос към комплексната функция на Института по катализ, отчитайки участието му в проекти насочени към биология и медицина. Експертиза на каталитичните изменения във свойствата на твърдотелни структури, чрез методите, които предоставят позитронната спектроскопия, а в частност и неутронната дифракция е безусловно нужен елемент, който би допълнил възможностите, на ИК. Откриването на достъп към тези, никак не евтини методи разширява спектъра на полезно действие на твърдотелната химия, прилагана в Института по катализ при БАН.

2. АВТОРСКА СПРАВКА НА НАУЧНИТЕ ПУБЛИКАЦИИ В ИЗДАНИЯ, КОИТО СА РЕФЕРИРАНИ И ИНДЕКСИРАНИ В (WEB OF SCIENCE И SCOPUS), ИЗВЪН ХАБИЛИТАЦИОННИЯ ТРУД – ПОКАЗАТЕЛ Г

Позитронната спектроскопия, разполага с няколко високочувствителни метода, които анализират дефекти в кристална структура. Методът доплерово разпределение, може да предостави информация за химичния състав и електронната структура чрез определяне на импулсното разпределение на електроните, участвали в анихилацията. По тази причина позитронната спектроскопия се явява комплексен подход, способен да определя както физическите параметри на на дефектите в материалите, така и химичните свойства на същите дефекти. Въпреки тази мощна способност на позитронната анихилация да извършва анализ върху дефектите в структурата, трябва да отбележим, че в редица случаи е необходимо допълнително комбиниране с други методи, като например неутронна дифракция, регенова дифракция, Раман и др. Това означава, че в много случаи се налага прилагане на комбиниран подход при структурните анализи на изследваните от нас материали.

Справката от основните научни приноси на изследователската работа извън хабилитационния труд е направена върху 11 научни публикации (публикации от Г1 до Г11). Основните научни приноси могат да бъдат обобщени тематично в следните направления:

- Радиационни материали [Г1, Г2, Г5, Г6, Г8, Г9, Г10]

- Корозионни материали [Г3, Г4, Г7, Г11]

2.1. Радиационни материали

Радиационна устойчивост и термична релаксация в нанокристален ZrB2.

Радиационна устойчивост и термична релаксация в нанокристален ZrB_2 поредица от свързани научни трудове [Г1, Г2, Г8] е изследвана структурната стабилност и радиационната толерантност на нанокристален циркониев диборид (ZrB_2, 99.2% чистота, хексагонална фаза P6/mmm) при експлоатация в силно динамични и радиационно натоварени среди. Като потенциален кандидат за първата стена в термоядрените реактори и за компоненти в аерокосмическата индустрия, материалът е подложен на детайлни тестове чрез облъчване с тежки йони и гама-лъчи, комбинирани с термична обработка. Цикълът от публикации отразява естественото развитие на работния процес и нуждите от детайлен анализ на новопоявили се данни, като научната значимост и на четирите труда се потвърждава от публикуването им в престижни международни издания с ранг Q1. Докато в първите три труда [Г1, Г2] еволюцията на дефектите е изследвана чрез време на живот на позитрона (PALS), S и W параметри, рентгенова дифракция и изчислителни симулации от тип Monte Carlo и DFT, в надграждащата работа [Г8] фокусът е изместен към детайлен

анализ на химичните промени в дефектите. Чрез метода на Доплеровото разширяване там е отчетено импулсното разпределение на електроните, участващи в тези процеси, а експерименталните данни са верифицирани чрез молекулярна динамика.

Изследванията разкриват фундаментални разлики в механизмите на увреждане в зависимост от вида на радиационния източник. Облъчването с бързи тежки йони $^{132}Xe^{26+}$ с енергия 167 MeV води до агресивна деградация на структурата, като се наблюдава образуване на остър дублет в дифракционните пикови, пълно разграждане на по-слабите рефлекси и повърхностна аморфизация, която нараства от 15.1% до 17.4% с увеличаване на флуенса. Разширението на параметрите на решетката под йонно въздействие протича на два етапа, засягайки предимно връзките Zr–B и B–B. За разлика от тежките йони, под въздействие на гама-източник 60Co се отчита непрекъснато Комптоново разсейване до енергия 0.23 MeV според MCNP Tally F4 симулациите. Гама-фотоните предизвикват значително по-ниска обемна аморфизация, възлизаща на едва 1.2% при максимална доза от 3000 kGy, както и дозово-зависимо увеличение на обема на решетката до максимум от 0.011 $Å^3$. Този процес е съпроводен с генериране на моно- и диваканции (V_{Zr}, V_B) и ваканционни клъстери от тип $2V_{Zr}$ + $6V_B$, което се регистрира чрез радиационно-индуцирано повишение на S-параметъра при 7 keV до стойност 0.4659.

Поведението на ZrB_2 при термично въздействие също показва различни аспекти в зависимост от предварителното състояние на материала. Нагряването в температурен градиент без облъчване между 373 K и 773 K води до нормално линейно разширение на решетката с коефициент 6.0 × 10−6 K−1, което се стимулира от дисоциацията на повърхностни OH групи и водни молекули, водеща до отделяне на реакционни продукти като $Zr(OH)_4$, H_3BO_3 и H_2. От друга страна, високотемпературното отгряване при 1173 K след гама-индуцирано увреждане активира специфичен механизъм за „самовъзстановяване“ на керамиката, протичащ без фазови преходи или допълнително окисление. Този процес се доказва от изчезването на повърхностните функционални групи в FTIR спектрите успоредно с интензификация в областта 650–838 cm−1, както и от нарастване на средния размер на зърната от 1.94 μm до 2.72–2.93 μm. В допълнение, аморфната фракция по данни от HRTEM спада рязко от около 1.2% до 0.2%, обемното разширение на решетката се свива наполовина до 0.005 $Å^3$, повърхностният оксиден слой се стабилизира на дебелина около 4 nm, а анализът на дифракционния пик (101) показва трикратно нарастване на кристалната подреденост.

Анализът на S-W графиката при 12 keV и електронното импулсно разпределение потвърждават, че дефектите се елиминират чрез термично възстановяване, а не чрез случайна рекомбинация. DFT симулациите верифицират тези структурни трансформации чрез изместване надолу на нивото на Ферми и умерено отслабване на $Zr^{(4d)}$-$B^{(2p)}$

хибридизацията, като еластичните константи намаляват съвсем слабо, което гарантира запазването на висока механична стабилност. Идентифицираният механизъм за самовъзстановяване съхранява структурната цялост на ZrB_2, удължава неговия експлоатационен живот и го прави отличен избор за първа стена на реактори, включително в състава на усъвършенствани ZrB_2-SiC композити или хибридни архитектури с течни метали.

В работа [Г5] са изследвани нанокомпозитни филми от полиетилен с висока плътност и силициев диоксид HDPE/SiO_2 като кандидат за радиационна защита и изолация при високи дози гама-облъчване (100–500 kGy). В този диапазон протичат конкуриращи се процеси на разкъсване на веригите и омрежване, които се балансират оптимално при добавяне на 5–10 wt% HDPE/SiO_2 наночастици. При критична доза от 300 kGy материалът достига 66% степен на кристалност, съпроводена с ламеларна реорганизация и уплътняване на морфологията. SAXS и WAXS анализите отчитат по-подредена структура с намалени дълъг период на ламелите и дебелина на кристалитите, докато при доза от 500 kGy започва да доминира окислителното разграждане. Чрез DBAS е потвърдено, че SiO_2 наночастиците потискат дефектообразованието, като запълват микрокухините и улавят позитроните в междуфазните граници, намалявайки образуването на орто-позитроний. Композитите с 5–10 wt% SiO_2 притежават най-висока радиационна устойчивост до 300 kGy, което ги прави перспективни за ядрената и аерокосмическата индустрия.

Волфрамовите композитни материали, легирани с ванадиев карбид (W-6wt%VC-1wt%C), демонстрират подобрена относителна плътност, твърдост, износоустойчивост и висока термична стабилност в сравнение с чистия волфрам [Г6]. За оценка на радиационната им устойчивост пробите са облъчени с хелиеви йони ($^3He^+$) с енергия 2.5 MeV, след което са анализирани чрез рентгенова (XRD) и неутронна (ND) дифракция, Раманова спектроскопия, атомно-силова микроскопия (AFM) и позитронна анихилация [Г6]. Чрез SRIM симулация е отчетена максимална стойност на DPA от 0.18, като дълбочината на проникване на хелиевите йони в материала варира в диапазона 58–65 nm. След облъчването се наблюдава леко нарастване на размера на кристалитите, което се дължи на термичния ефект от йонния сноп и натрупването на хелиеви атоми в обема на зърната. Механизмите на радиационно увреждане включват образуване на повърхностни хелиеви мехурчета с максимален размер под 100 nm. Сходните резултати от допълващите се рентгенови и неутронно-дифракционни изследвания, подкрепени от измерванията на времето на живот на позитроните, доказват липсата на съществена структурна деформация в пробите вследствие на йонната бомбардировка. В допълнение, позитронно-волтажният анализ индикира, че последващото петчасово вакуумно отгряване при 1000 °C води до ефективна релаксация и възстановяване на по-голямата част от обемните ваканционни дефекти в композита [Г6].

Изследването [Г9] демонстрира прилагането на 100 keV P^+ йонна имплантация при стайна температура и флуенс в диапазона 10^{13}–10^{15} йона·cm^{-2} за контролирано генериране на структурни дефекти и модифициране на свойствата на тънки филми от $BiVO_4$. За първи път чрез комбиниране на експериментални PAS измервания с бавен позитронен сноп (VEPB) и теоретични TC-DFT симулации е детайлизирана флуенс- и дълбочинно-зависимата еволюция на точкови и комплексни дефекти в материала. Спирането и обхватът на имплантираните йони са контролирани чрез SRIM симулации, а промените в електронната структура, морфологията и оптичните свойства на филмите са оценени чрез комплекс от методи, включващи VEDB, VEEMD, RBS, HR-TEM, SEM, XRD, Раманова, PL и UV-Vis спектроскопия.

Анализите разкриват, че дефектообразуването протича в три отчетливи зони по дълбочина на филма. В приповърхностната област (0–30 nm) се наблюдава прогресивна аморфизация на структурата, като при най-нисък флуенс (~10^{13} йона·cm^{-2}) се формират конкуриращи се кислородни (V_O) и бисмутови (V_{Bi}) ваканции, докато при високи флуенси (10^{14}–10^{15} йона·cm^{-2}) изцяло доминира образуването на V_{Bi}. В междинната област (30–117 nm), където фосфорните йони са концентрирани с най-висока плътност в пика около 80–100 nm, еволюцията става по-сложна поради антиструктурното заместване на кислород с фосфор (P_O), което се свързва с бисмутови ваканции в комплексни дефекти от тип $V_{Bi} + P_O$. При високи флуенси в тази зона се отчита и междувъзлово включване на P в решетката, причиняващо нейното обемно разширение. В най-дълбоката имплантирана област (117–225 nm) ниският флуенс продължава да стимулира образуването на V_{Bi} и $V_{Bi} + P_O$, докато високите дози водят до генерирането на нов сложен дефект, съчетаващ ванадиева ваканция с антиструктурен фосфор ($V_V + P_O$).

Проведените експериментални изследвания и квантово-химични изчисления доказват, че P^+-индуцираните дефекти (V_O, V_{Bi} и $V_{Bi} + P_O$) модулират положително електронната структура на $BiVO_4$, подобряват транспорта на зарядите и оптимизират оптичните му свойства. Това води до съществено нарастване на неговите фотокаталитични характеристики и доказва ефективността на йонната имплантация като прецизен инструмент за дефектно инженерство в тънкослойните полупроводникови материали [Г9].

В работа [Г10] е изследвана многомащабната структурна еволюция и радиационна толерантност на тежки сплави W-Ni при облъчване с 2.5 MeV He^+ йони. Оригиналният научен подход комбинира атомистично моделиране (MD с MEAM+ZBL потенциали и DFT) с допълващи се експериментални методи, включващи XRD с Ритвелдов анализ и Раманова спектроскопия. Междуатомните потенциали за W-Ni системата са конструирани чрез сплайн фитинг на MEAM, стандартен ZBL и Кулонови потенциали за пълно характеризиране на симулационната клетка. Симулациите на молекулярна динамика (MD) в LAMMPS, проведени за седем произволно избрани PKA посоки, количествено

определят сценарий с ниско ефективно увреждане. Резултатите разкриват, че въпреки инициираните каскади от сблъсъци, по-голямата част от изместените атоми се рекомбинират бързо обратно в решетката, предотвратявайки натрупването на стабилни Френкелови двойки. Тази висока склонност към саморекомбинация се потвърждава на ниво DFT чрез локална енергийна релаксация на дефектите, предотвратяваща дестабилизирането на системата. В микроструктурен мащаб експерименталните XRD и Раманови измервания в диапазона на флуенса от $3.3x10^{14}$ до $3.3x10^{17}$ йона/cm^2 доказват цялостно запазване на фазовата архитектура и наличие на ограничени, контролирани модификации.

Многомащабният анализ показва, че радиационната толерантност на системата не се дължи на пълното отсъствие на повреди, а на високата скорост на рекомбинация и капацитета на междуфазните граници да действат като поглътители на дефекти. Докато bcc-W матрицата запазва решетъчната си стабилност, структурната реконфигурация, дефектите и микродеформациите от набъбване са локализирани и концентрирани главно в минорната тетрагонална фаза Ni_4W и по нейните интерфейси с волфрама. За да служи ефективно като област за акомодация и абсорбиране на дефекти, фазата Ni_4W трябва да бъде фино и прекъснато диспергирана в структурата, а не под формата на едри непрекъснати области. На практика това изисква прецизен контрол на съдържанието на Ni и параметрите на праховата металургия, включително хомогенността на смесване, графиците на синтероване, скоростта на охлаждане и термичната обработка след синтероването. По този начин основният технологичен подход се фокусира върху оптимизиране на фазовата фракция и архитектурата на интерфейсите за постигане на балансирана радиационна устойчивост, предоставяйки концептуална основа за проектиране на структурни материали за термоядрени реактори чрез контролирано дефектно инженерство [Г10].

Обобщение на научни приноси за направление "Радиационни материали":

ZrB_2: Чрез позитронна спектроскопия е анализирано изменението на свойствата му след йонно и гама-облъчване. Резултатите са верифицирани с FTIR, рентгенова дифракция и симулации (Monte Carlo и молекулярна динамика).

HDPE/SiO_2 филми: Изследвано е гама-облъчването на нанокомпозити (5–10 wt% пълнител). SiO_2 наночастиците запълват микрокухините и потискат дефектите, постигайки 66% кристалност и уплътнена морфология, което прави материала подходящ за радиационна защита в ядрената и аерокосмическата сфера.

Волфрамови композити (W-6wt%VC-1wt%C): Анализирани при облъчване с хелиеви йони (до 0.18 DPA). Бомбардировката предизвиква само лек ръст на кристалитите и повърхностни мехурчета под 100 nm, което е потвърдено чрез XRD и ND.

$BiVO_4$: Разгледана е възможност за дефектно инженерство чрез флуенс- и дълбочинно-зависима модификация за по-добри фотокаталитични свойства. Експерименти (VEPB, PAS) и теория (TC-DFT, SRIM) разкриват комплексни дефекти (кислородни/бисмутови ваканции и антиструктурен фосфор) в три зони по дълбочина.

Сплави W-Ni: Анализът доказва висока радиационна толерантност при йонно облъчване поради бърза саморекомбинация и поглъщане на дефекти от междуфазните граници. Дефектите се локализират в минорната фаза Ni_4W, докато bcc-W матрицата е стабилна, което изисква прецизен контрол на праховата металургия.

2.2. Корозионни материали

В научните трудове [Г3] и [Г4] е изследвано влиянието на легиращите добавки от силиций Si и ниобий Nb, както и на съотношението C/N, върху структурно-фазовия състав, неутронната активация и електрохимичното корозионно поведение на многокомпонентни карбонитридни покрития, като нанокристалните покрития от типа CNTi-(Zr, ZrNb и ZrSi) са отложени чрез катодно-дъгов метод върху подложки от титанова сплав Ti_6Al_4V и неръждаема стомана 316L при контролирано съотношение C/N около 0.5 с цел постигане на превъзходна защитна способност в агресивни среди. Морфологичният и фазовият анализ показват, че покритията TiZrSiCN притежават уникална архитектура, състояща се от нанокристална фаза TiCN и аморфна матрица Si_3N_4, като изпитванията за устойчивост в силно корозивен разтвор на 3.5% NaCl разкриват съществени разлики в защитния капацитет и деструктивните механизми на модифицираните системи в сравнение с базовия кватернерен TiZrCN. Въвеждането на силиций в матрицата TiZrSiCN води до драстично подобряване на корозионната устойчивост, осигурявайки до 92% ефективност на защитата чрез специфичен перпендикулярен механизъм, генериращ характерни кръгови корозионни модели, докато легирането с ниобий TiZrNbCN с около 5.5 at% провокира локализирана точкова корозия и намалява общата корозионна устойчивост 1.39 пъти спрямо изходния TiZrCN, въпреки че и двете системи остават по-стабилни от нелегираните карбонитриди. Важен аспект от изследванията е оценката на радиационната толерантност на покритията чрез прилагане на инструментален неутронно-активационен анализ, съчетан с последваща гама-лъчева спектрометрия за прецизно улавяне на примеси и радиоактивни изотопи в обема на пробите и подложките. След проведеното интензивно облъчване с бързи неутрони при номинална мощност от 1450 kW е установено, че нито едно от изследваните покрития не претърпява процеси на дълготрайна радиоактивна активация, като бомбардирането с неутронни потоци не оказва абсолютно никакво

влияние върху повърхностната морфология, кристалната структура или дебелината на слоевете, доказвайки тяхната изразена радиационно-устойчива природа и липса на структурна деформация при тези критични режими на работа. Синтезираните експериментални и теоретични резултати категорично потвърждават, че подстехиометричните карбонитридни покрития, и по-специално тези от системите TiZrSiCN и TiZrNbCN, притежават изключителен баланс от трибологични параметри, адхезия, механична стабилност и радиационна толерантност, което ги определя като високоперспективни кандидати за повърхностна защита на компоненти в ядрените технологии и аерокосмическото дело.

Изследванията в работа [Г11], заедно с публикации [Г3] и [Г4], представят комплексен теоретичен и експериментален анализ на многокомпонентни покрития на базата на Ti(C,N). В настоящия труд систематично са изследвани системите TiSiCN, TiNbCN, TiZrCN, TiZrSiCN и TiZrNbCN, отложени чрез катодно-дъгово изпарение. Чрез интегриране на позитронно-анихилационна спектроскопия (PALS), DFT (GGA) изчисления, Раманова спектроскопия, SEM и оптична профилометрия са установени количествени корелации между електронната структура, дефектите, фононното поведение и повърхностната морфология. Резултатите доказват, че контролираният елементен дизайн – по-специално внедряването на Si в комбинация със Zr и Nb – е ефективна стратегия за управление на дефектната архитектура и оптимизиране на експлоатационните свойства на тези съвременни защитни покрития за индустриални и ядрени приложения.

В научна работа [Г7] е изследвано влиянието на налягането върху свойствата на ZrO_2 при композити от Al_2O_3 – YSZ. Тази керамика от системата Al_2O_3-YSZ (ZTA) е сред най-перспективните композитни материали заради високата си твърдост, якост, износоустойчивост, биосъвместимост, термична, химическа и радиационна стабилност. Матрицата е съставена от α-Al_2O_3, а пълнителят – от циркониев диоксид, стабилизиран с 3 mol.% итриев оксид (YSZ). Тъй като стандартните методи изискват температури на синтероване >1600 °C за постигане на относителна плътност >95%, изследванията се насочват към тяхното понижаване чрез техники като зародишно и шликерно леене (≤1400 °C) или въвеждане на MgO като евтектична добавка (1500 °C). Настоящата работа изследва влиянието на високото хидростатично налягане върху структурата и физико-механичните свойства на композитна керамика със състав Al_2O_3+nYSZ (n = 0, 1, 5, 10, 15 тегл. %), получена на базата на прах от метастабилни θ + γ-Al_2O_3 фази.

Експерименталните резултати показват, че максимални физико-механични показатели се постигат при състави с 10% и 15% YSZ (отгряти при 1000 °C), компресирани под налягане от 700 MPa и синтеровани при 1550 °C за 2 часа. За състава с 10% YSZ се отчита плътност ρ = 4.1 g/cm³, твърдост H_v = 20.16 GPa и якост σ = 338 MPa, а при 15% YSZ стойностите са съответно ρ = 4.09 g/cm³, H_v = 18.5 GPa и σ = 396 MPa. Чрез SEM анализ е доказано, че

налягането управлява пространствената локализация на YSZ зърната: при 300–500 MPa те се концентрират в междугранулното пространство на α-Al_2O_3, а при 600–700 MPa се разпределят хомогенно в целия обем и ефективно предотвратяват образуването на агломерати при концентрации ≥ 10 тегл. %. Установено е също, че при по-ниските налягания протича първична рекристализация с нормален растеж на зърната, докато обработката при 600–700 MPa индуцира вторична рекристализация, формираща бимодално разпределение на матричната фаза по размери. От гледна точка на дефектообразуването, във всички проби се наблюдават алуминиеви ваканции, като въвеждането на 10% и 15% YSZ стимулира генерирането на по-големи дефектни клъстери, състоящи се от повече от две алуминиеви и съседни на тях кислородни ваканции.

Обобщение на научни приноси за направление "Корозионни материали":

Покрития TiZrSiCN и TiZrNbCN: Отложени чрез катодно-дъгов метод, те показват отлична корозионна устойчивост и радиационна толерантност за ядрената и аерокосмическата индустрия. Силицият (Si) повишава защитната ефективност до 92%, а неутронните тестове доказват структурна стабилност с практически нулева радиоактивна активация.

Ti(C,N) покрития: Доказано е, че контролираният елементен дизайн и внедряването на Si в многокомпонентните покрития позволяват прецизно управление на дефектната им структура за оптимизиране на свойствата им в индустриални и ядрени приложения.

Композитна керамика Al_2O_3-YSZ: Високото хидростатично налягане (600–700 MPa) осигурява хомогенно разпределение на YSZ зърната в Al_2O_3 матрицата без агломерати. Този подход индуцира вторична рекристализация, като при 10–15% YSZ се постигат максимална плътност, твърдост и якост.

3. ПУБЛИКАЦИИ

3.1. „В“- Научни публикации включени в хабилитационната справка

Списък на научните публикации, участващи в конкурса като еквивалентен брой статии за хабилитационен труд, които не повтарят представените по други конкурси за заемане на академични длъжности и придобиване на научни степени

B1. Q. Xu, **E. Popov,** T. Troev, J. Zhang, Y. Dai, Positron lifetime calculation of vacancy clusters in tantalum containing hydrogen and helium, Journal of Nuclear Materials, Volume 506, Pages: 71-75, 2018.,
https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.06.011
scimagojr

B2. Samir F. Samadov, Nguyen V.M. Trung, Alexander A. Donkov, Aleksey A. Sidorin, Oleg S. Orlov, Ertuğrul Demir, Oktay A. Samedov, Sakin H. Jabarov, Nguyen V. Tiep, **Evgeni P. Popov***, Matlab N. Mirzayev, Investigating the impact of gamma irradiation and temperature on vacancy formation and recombination in ZrB_2 ceramics using positron annihilation spectroscopy, Journal of Nuclear Materials, Volume 599, (2024), 155242
https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2024.155242
scimagojr

B3. Abiyev, A.S., Samadov, S.F., Mirzayev, M.N., Huseynov, E.M., Sidorin, A.A., Orlov, O.S., Samedov, O.A., Aliyev, Y.I., Huseynov, H.J., **Popov, E.**. Defect formation analysis in gamma-irradiated titanium nitride nanocrystals: predictions from positron annihilation studies, Journal of Nanoparticle Research, **26**, 156 (2024),
https://doi.org/10.1007/s11051-024-06059-3
scimagojr

B4. D.Neov, L.Slavov, A.A. Donkov, M.N.Mirzayev, **E.Popov**, E.Demir, K.Siemek, N. Djourelov, V.A.Turchenko, Z.A.Sharipov, P.Horodek, A.I.Beskrovnyi, A.H.Valizade, O.A.Samedov, A.Vladescu, K.Krezhov, I.Felicia, Structural study of W_2B obtained via me chanical alloying of W, B_4C, TiC and graphite before and after He ions irradiation, Nuclear Materials and Energy, Volume 31, June 2022, 101201,
https://doi.org/10.1016/j.nme.2022.101201
scimagojr

B5. Ertugrul Demir, **Evgeni Popov**, Matlab Mirzayev, Lyubomir Slavov, Dimitar Neov, Alexander Donkov, Krzysztof Siemek, Tatiana Vershinina, Ivaylo Genov, Anatolii Beskrovnyi, Vladimir Skuratov, Kiril Krezhov, Pawel Horodek, Fadahat Mamedov, Aygul Valizade, Ozlem Vural, Effects of swift heavy ions at different fluencies on WC-6Co hard metal alloy, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Volume 106, August 2022, 105865,
https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.105865
scimagojr

B6. Matlab N Mirzayev, Alexander A Donkov, **Evgeni Popov**, Ertugrul Demir, Sakin H Jabarov, Levan S Chkhartishvili, Samuel A Adeojo, Aleksandr S Doroshkevich, Alexey A Sidorin, Asif G Asadov, Thabsile T Thabethe, Mayeen U Khandaker, Sultan Alamri, Hamid Osman, Alex V Trukhanov, Sergei V Trukhanov, Modeling and X-ray Analysis of Defect Nanoclusters Formation in B4C under Ion Irradiation, Nanomaterials, 2022, 12(15), 2644, https://doi.org/10.3390/nano12152644
scimagojr

B7. **E. Popov**, P. Staykov, K. Berovski, S. Peneva, N. Djourelov and T. Troev; Positron Momentum Calculation of Defects in α-Fe and Fe-Cr Containing Hydrogen and Helium; Journal of Physics: Conference Series 516 (2014) 012034.
http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/516/1/012034
scimagojr

B8. **E.P. Popov**, A.N. Chernikov, A.I. Beskrovnyi, J. Waliszewski, M.N. Mirzayev, Cryostat for cooling samples in the study of low-temperature structural and magnetic phase transitions by neutron diffraction, Journal of Physics: Conference Series 1492 (1), 012054, 2020.
https://doi.org/10.1088/1742-6596/1492/1/012054
scimagojr

3.2. „Г"–Научни публикации, включени в извън хабилитационната справка

Списък от публикациите, участващи в конкурса по група от показатели Г, които не повтарят представените по други конкурси за заемане на академични длъжности и придобиване на научни степени

Г1. Mirzayev, M.N., Abiyev, A.S., Samedov, O.A., Demir E., **Popov, E.P**., Samadov, S.F., Structural evolution of zirconium diboride under gamma irradiation and thermal annealing, Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1005, 175970,
https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175970
scimagojr

Г2. S.F. Samadov, A.S. Abiyev, A.G. Asadov, N.V.M. Trung, A.A. Sidorin, O.A. Samedov, **E.P. Popov**, E. Demir, T. Vershinina, Y.I. Aliyev, K.M. Hasanov, M.N. Mirzayev, Investigating the crystal structure of ZrB2 under varied conditions of temperature, pressure, and swift heavy ion irradiation, Ceramics International, Volume 50, Issue 2, Part B, 15 January 2024, Pages 3727-3732,
https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.11.125
scimagojr

Г3. M.N. Mirzayev, K.M. Hasanov, A.C. Parau, E. Demir, A.S. Abiyev, Tamer Karaman, S.H. Jabarov, M. Dinu, **E.P. Popov**, A. Vladescu (Dragomir), Effect of the C/N ratio modification on the corrosion behavior and performance of carbonitride coatings prepared

by cathodic arc deposition, Journal of Materials Research and Technology, Volume 27, November–December 2023, Pages 1724-1738,
https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.318
scimagojr

Г4. A. Vladescu (Dragomir), M.N. Mirzayev, A.S. Abiyev, A.G. Asadov, E. Demir, K.M. Hasanov, R.S. Isayev, A.S. Doroshkevich, S.H. Jabarov, Sv. Lyubchyk, S. Lyubchyk, **E.P. Popov**, Effect of Si and Nb additions on carbonitride coatings under proton irradiation: A comprehensive analysis of structural, mechanical, corrosion, and neutron activation properties, Nuclear Materials and Energy, Volume 35, June 2023, 101457,
https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101457
scimagojr

Г5. Nabiyev A.A., Ivankov O.I.. Azhibekov A.K., Elmekawy A.H.A., **Popov E.**, Samadov S.F., Trung N.V.M., Mutali A.K., Sidorin A.A., Orlov O.S., Kuklin A.I., High-dose gamma irradiation effects on HDPE/SiO_2 nanocomposite films: Structure, crystallinity, defects, radiation endurance, dispersion, and interfacial behavior, Polymer Degradation and Stability, Volume 245, 2026, 111851,
https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111851
scimagojr

Г6. E. Demir, M.N. Mirzayev, **E.P. Popov**, P. Horodek, I.G. Genov, K. Siemek, D.M. Mirzayeva, V.A. Turchenko, M. Bulavin, A.I. Beskrovnyi, A.H. Valizade, H.V. Akhundzada, Effects of high-energetic $^{3}He^{+}$ ionirradiation on tungsten-basedcomposites, Vacuum, Volume 184, February 2021, 109934.,
https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109934
scimagojr

Г7. A.V. Maletskyi, T.E. Konstantinova, G.K. Volkova, D.R. Belichko, A.S. Doroshkevich, **E. Popov**, N. Cornei, B. Jasinska, Zh.V. Mezentseva, A.A. Tatarinova, M.N. Mirzayev, L.H. Khiem, I. Ristić, V. Teofilović, R. Balvanović, High hydrostatic pressure influence on the properties and tendency to agglomeration of ZrO_2 grains of the Al_2O_3 – YSZ composite ceramics system, Ceramics International, Volume 49, Issue 10, 15 May 2023, Pages 16044-16052,
https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.202
scimagojr

Г8. Samadov, S. F., Ismayılova, N., **Popov, E.**, Tuyen, L. A., Trung, N. V. M., Samedov, O. A., Sidorin, A. A., Orlov, O. S., Jabarov, S., Hue, P. T., Hue, N. T. N., Tiep, N. V., Quang Hung, N., & Mirzayev, M. N. (2026). Gamma-irradiation-induced defects and thermally driven recovery in ZrB_2. Materials Chemistry and Physics, 353, 132107., https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2026.132107,
scimagojr

Г9. Luu T.A., Trung N.V.M., Van T.N., Turek M., Drozdziel A., Pyszniak K., Sidorin A.A., Donkov A.A., Orlov O.S., Ly N.L., Pham H.T., Nguyen H.T.N., Phuc T.V., Hoang L.V., Le L.T., Mitrofanov S.V., Ismayilova N., Jabarov S.H., Kirilkin N., Abiyev A.S., Tuan P.L., Vershinina T., **Popov E. P.**, Samadov S.F., Mirzayev M.N., Van N.T.T., Tran N., Tran P.D., Hung N.Q.. Ion implantation-driven defect engineering in $BiVO_4$ thin films for catalytic applications, Ceramics International, Volume 52, Issue 9, Part B, April 2026, Pages 12572-12588,
https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2026.01.403
scimagojr

Г10. Samadov S.F., Nasrabadi M.N., Ismayılova N.A., Trung N.V.M., Rizi S.H., Luu, A. Tuyen, Samedov O.A., Jabarov S.H., **Popov E.P.**, Abiyev A.S.. Interface-mediated He^+ irradiation tolerance of W-Ni heavy alloys for fusion plasma-facing components: Defect absorption and phase stability, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Volume 138, August 2026, 107767,
https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2026.107767
scimagojr

Г11. Mirzayev, Matlab N., Atilgan A., Samadov S.F., Buyuk B., Kamislioglu M., Isayeva S., Mauyey B., Nesipbay A.J., Lyubchik A., Demir E., Kaminski G., Mirzayeva D.M., Doroshkevich A.S., Ashraf G.A., **Popov E. P.**. Interfacial interactions and free volume in multicomponent titanium-based carbon-nitrides coatings, Ceramics International, Volume 52, Issue 9, Part B, April 2026, Pages 12826-12835,
https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2026.01.424
scimagojr