

РЕЦЕНЗИЯ

от проф. д-р Богдан Рангелов, Институт по физикохимия–БАН

върху

ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД

представен за присъждане на образователната и научна степен „**доктор**“ по професионално направление 4.1. Физически науки, докторска програма “Физика на кондензираната материя”

Тема: **РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИЗНОСОУСТОЙЧИВИ НАНОКОМПОЗИТНИ ПОКРИТИЯ С МОДУЛИРАН СЪСТАВ ЗА МНОГОФУНКЦИОНАЛНИ ПРИЛОЖЕНИЯ**

Автор: **Стефан Димитров Колчев**, редовен докторант към Централна лаборатория по приложна физика (ЦЛПФ) - БАН, Пловдив

Научен ръководител: проф. д-р Лиляна Колаклиева

Научен консултант: проф. д-р Румен Каканак

I. Материали по процедурата:

Стефан Димитров Колчев е зачислен за редовен докторант по професионално направление 4.1. Физически науки, докторска програма “Електрически, оптични и магнитни свойства на кондензираната материя” към ЦЛПФ-БАН, Пловдив от 01.01.2020 г. със заповед номер 41 от 20.12.2019 г. на директора на ЦЛПФ. Със заповед номер 41 от 15.12.2022 г. на директора на ЦЛПФ, срокът за изпълнение на докторантурата е удължен със шест месеца. Междувременно, поради промяна в основната дейност на ЦЛПФ-БАН, през 2021 г. лабораторията получава от Националната агенция за оценяване и акредитация, акредитация по докторската програма “Физика на кондензираната материя”. Във връзка с тази промяна, Националният център за информация и документация разрешава докторант Стефан Колчев да премине от докторска програма “Електрически, оптични и магнитни свойства на кондензираната материя” в докторската програма “Физика на кондензираната материя”. Стефан Колчев е отчислен с право на защита със заповед номер 29 от 28.09.2023 г. на директора на ЦЛПФ. Докторантът е положил всички изпити, съгласно индивидуалния учебен план, а представените материали по процедурата за присъждане на ОНС „доктор“ отговарят на изискванията на ЗРАСРБ и правилника за неговото приложение (приложени са дипломи, автореферат, дисертационен труд, удостоверение за положени изпити, справки и използвани публикации).

Справката за изпълнението на минималните национални изисквания от ЗРАСРБ за научна област 4.1. Физически науки показва, че активите на кандидата надхвърлят минималните национални изисквания по групи показатели Г, Д и Ж. Като цяло, представените материали са представени пълно и подредено описани, като дават възможност за оценка на дисертационния труд на кандидата.

II. Образование и професионално развитие:

Стефан Димитров Колчев получава средно специално образование (Технология на машиностроенето) в професионална гимназия „Иван Хаджигенов“ – Казанлък, бакалавър по химия към Пловдивски университет, магистър по специалност „Химия и екология“ към същия университет (2013 г. – 2014 г.). Владее английски език. От 2020 г. започва работа в ЦЛПФ-БАН, Пловдив като технолог, а впоследствие преминава на длъжността химик и на длъжността асистент, която заема и към момента. Съавтор е на един полезен модел (начало на действие на регистрацията от 27.12.2023 г., регистрационен номер 4658 U1) със заглавие „Планетен карусел за задвижване на образци в устройство за физично парно отлагане“.

III. Актуалност на темата:

Темата на дисертационния труд на докторант Стефан Колчев е посветена на изследване на механичните и трибологични свойства, морфология, състав и структура на твърди и свръхтвърди тънки слоеве (покрития), нанесени върху метални повърхности чрез PVD (физично отлагане от газова фаза) технологии. Разработването на високоефективни покрития с подобрени механични и функционални характеристики представлява една от най-динамично развиващите се области в съвременното материалознание и насоченото модифициране на повърхности. Особено внимание в последните години привличат тънките поликристални покрития, които позволяват целенасочено комбиниране на различни фази и структурни елементи с цел постигане на висока износоустойчивост, термична и химична стабилност, както и допълнителни функционалности, съответстващи на конкретни експлоатационни изисквания. Нарастващите изисквания към дълготрайност, устойчивост на износване и екстремни натоварвания в редица индустриални отрасли – включително машиностроене, авиация, микромеханика и биомедицина – изискват разработването и детайлното характеризиране на покрития с контролирани свойства на микро- и нанониво. Особено съществено е, че изследванията в дисертационната работа са фокусирани върху износоустойчиви нанокомпозитни покрития с променлив (модулиран) състав, което е в пълно съответствие с актуалните научни и приложни приоритети в областта на трибологията, защитните покрития и инженерната нанотехнология. Потенциалните приложения на подобни покрития обхващат широк спектър – от машиностроене и енергетика до биомедицински и електронни компоненти, при което изискванията към устойчивост на износване, химическа инертност и структурна цялост са изключително високи.

Темата е в пълно съзвучие и с приоритетните направления, заложи в стратегическите документи на Европейския съюз, включително „Хоризонт Европа“ и Стратегията за интелигентна специализация. Изследванията в областта на устойчивите, интелигентни и функционални материали са идентифицирани като ключови за реализирането на цели, свързани с екологична устойчивост, енергийна ефективност и цифрова трансформация. Разработването на иновативни нанокомпозитни покрития, притежаващи многофункционални свойства и повишена дълготрайност, намира

естествено място в рамките на приоритетите на индустрията, както и в направления, свързани със зелени технологии, авангардното производство и устойчивото инженерство. С оглед на гореизложеното, настоящата тематика може да се определи като високоактуална, интердисциплинарна и с ясно изразена приложна насоченост, притежаваща значим потенциал за развитие на нови поколения функционални материали и технологии.

IV. Наукометрични показатели свързани с дисертацията:

Резултатите от дисертационния труд са публикувани в две статии, в които кандидатът е първи автор. Списанието е MDPI Coatings, безспорно престижно международно списание в областта. По тези публикации има посочени 5 (пет) цитата, което за статии публикувани през 2023 и 2025 година е показателно за актуалността на темата на дисертацията. Библиографията на двете статии е както следва:

a) **Kolchev S.**, Kolaklieva L., Chitanov V., Cholakova T., Zlatareva E., Kovacheva D., Atanasova G., Kakanakov R. „The Role of Period Modulation on the Structure, Composition and Mechanical Properties of Nanocomposite Multilayer TiAlSiN/AlSiN Coatings“, *Coatings*, 13 (9), 1546, (2023), DOI: 10.3390/coatings13091546;

b) **Kolchev S.**, Kolaklieva L., Kovacheva D., Atanasova G., Cholakova T., Chitanov V., Zlatareva E., Kakanakov R., Pashinski C. „Mechanical and Tribological Behavior of TiAlSiN/AlSiN Coatings Depending on the High-Temperature Treatment“, *Coatings*, 15 (5), 542, (2025), DOI: 10.3390/coatings15050542.

V. Структура и съдържание на дисертационния труд:

Дисертационният труд спазва общоприетите правила за структура и е съставен от разделите (глави): въведение, материали и методи, резултати и дискусия, заключение с обобщение на постигнатите резултати (което отчитам като приноси) и изводи. Следва библиография от 250 (редно е да се отбележи големия брой) заглавия. Дисертацията (без библиографията) съдържа 127 страници, 64 фигури и 16 таблици. Добро впечатление прави изваждането на всички използвани съкращения в началото на дисертацията – страници 6 и 7. От тези съкращения на използваните термини, категорично не бих се съгласил, че „Normal force“ и „Вертикално приложена сила“ са едно и също нещо, освен ако няма изрично допълнителни уточнения. Като цяло „Normal force“ не е „Вертикално приложена сила“.

В увода (въведение) авторът акцентира върху актуалността на темата - изследване на механичните и трибологични свойства, морфология, състав и структура на твърди и свръхтвърди тънки слоеве (покрития), нанесени върху метални повърхности чрез PVD технологии. Дискутирани са методи за модифицирането на повърхности с оглед на подобряване на свойствата на повърхностите и съответните подходи – а) модифициране на повърхността под въздействието на различно третиране (термично, химично и др.), което въздейства на състава и/или структурата в приповърхностната област и втори подход б) при който модифицирането на повърхността се извършва чрез нанасяне на покрития с определени свойства, като съставът и структурата на тези покрития могат да се различават съществено от тези на обемния материал, като е показано, че при този

подход се постигат изцяло нови свойства на повърхността, което е невъзможно да се реализира с други методи. Направен е преглед на съществуващите различни методи за нанасяне на покрития за индустрията - галванични и електрохимични покрития, които обаче имат съществен недостатък, а именно, че включват процеси, придружени от отделяне на различни замърсители (в голямата си част и токсични спрямо живи организми) на околната среда. Алтернативния и налагащ се метод е свързан с физичните методи за нанасяне на тънки поликристални покрития от газова фаза във вакуумна среда върху изделия от различни материали (т. нар. PVD покрития). По отношение на различни инструменти, които се използват в промишлеността са дискутирани предимствата на тези PVD покрития, а именно: основно подобряване на устойчивостта и на времето на живот на използваните инструменти за дейности като рязане, пробиване и формоване – дейности свързани с производството на механични компоненти (детайли), изложени на тежки работни условия като висока температура и интензивно триене. Покритията се характеризират с висока твърдост, химическа инертност, термоустойчивост и нисък коефициент на триене. В резултат на едно такова подобрение се а) намалява износването – твърдата повърхност поема абразивното натоварване, запазвайки геометрията на режещия ръб; б) увеличава се термозащита – термоустойчивите покрития намаляват нагряването на основата и предотвратяват т. нар. „отпускане“ на закалени стомани; с) намалява се триенето – улеснява стружкоотвеждането и се намалява локалното „залепване“ на обработвания материал; и не на последно място d) увеличава се корозионна защита поради наличието на бариерен слой срещу окисление и химическа атака. Дискутирани са многослойните PVD покрития, които имат приложение в автомобилната и други индустрии по отношение на инструментите за формоване като матрици и щанци, използвани при изтегляне или формоване на ламарина – инструментите се подлагат на значителни механични и термични натоварвания, както и на интензивно триене с обработвания материал. Тези покрития се състоят от: а) твърди базови слоеве (основно CrN, TiN, TiCN или TiB₂), които осигуряват висока твърдост, и служат като носеща основа, която поема основната част от механичното натоварване; б) относително меки горни слоеве с нисък коефициент на триене (MoS₂ или аморфен въглерод a-C), които действат като сухо смазване. Те намаляват контактното триене между инструмента и обработвания лист, улесняват плъзгането на материала и предотвратяват повърхностни надрасквания или задириания. Така, комбинацията от твърда подложка и „мек, смазочен“ горен слой позволява значително намаляване на износването, използване на по-ниски сили за формоване, както и работа при намалено количество или пълно отсъствие на смазочно-охлаждащи течности. В резултат се постига по-висока производителност, по-дълъг срок на експлоатация на скъпите формовачи инструменти и по-високо качество на произвежданите детайли. Дискутирана е необходимостта от многофункционални покрития, издържащи на изключително високото налягане, от порядъка на 2000 bar и повече, в съвременните дизеловите системи за впръскване, функционалните покрития върху автомобилните стъкла, покритията върху лопатките на компресорите, използвани в самолетните газови турбини, и съответните решение, свързани с нанасянето на титанов нитрид TiN базирани многослойни, устойчиви на ерозия покрития. Коментирани е и интересът към създаване

на биосъвместими покрития за медицината и стоматологията. Направен е преглед на развитието в течение на годините на титанов и хромен нитрид и последващото преминаване към тройни и четворни системи. Последователно в изложението на тази уводна част се прави и литературен обзор, който е задълбочен, подробен и представлява добро описание на текущото състояние в научно-приложните изследвания в тази динамична научна област. Направен е детайлен анализ на текущите изследвания по многослойните PVD покрития и са дискутирани проблемите и предизвикателствата свързани с осигуряване на максимална твърдост, но и с постигане на максимална еластичност от друга страна, както и осигуряване на стабилност на механичните и трибологични свойства при високи температури. Коментирано е комбинирането на титан и хром нитридни съединения в едно покритие с добавянето на легиращи елементи като Al, B, C, V, Si. Така се формират тройни или четворни съединения с повишена температурна стабилност, подобрени механични свойства и устойчивост на износване. Използването на термина „спинодално разлагане“ е по-добре да бъде заменен с общоприетия „спинодален разпад“. Показано е, че за тройните TiAlN и CrAlN покрития, въпреки подобрените им механични и трибологични свойства, термичната им стабилност е ограничена до температури от порядъка на 800 °C. Така поднесеното на читателя въведение подготвя и поставянето на целите и задачите на дисертационния труд, а именно: чрез модулиране състава на покритието, да се разработи и изследва свръхтвърдо покритие за модифициране на повърхности, съчетаващо подобрени механични и трибологични свойства, стабилно при високи работни температури, което да позволи многофункционални индустриални приложения. Поставените задачи са амбициозни и включват: *i)* Избор на елементен състав и разработване на архитектурата на покритието; *ii)* Разработване и оптимизиране на технологията за нанасяне на покритието; *iii)* Изследване на механичните свойства на оптимизираното покритие; *iv)* Изследване на структурата и състава на разработеното покритие; *v)* Изследване на трибологичните свойства на оптимизираното покритие; *vi)* Изследване на температурната устойчивост на механичните и трибологични свойства на оптимизираното покритие. В тази уводна част има допуснати и доста (надявам се неволни) правописни грешки, които не правят добро впечатление.

Първа глава започва с описание на механизмите на формиране и растеж на тънки (защитни) филми. Би следвало да се започне с най-общо представяне на условията за формиране на тънки филми изобщо, както и с общо представяне на механизмите на зародишообразуване и растеж. Като основни условия за формиране на тънки филми трябва да бъдат отбелязани: Пресищането (ключов параметър), Енергията на зародишообразуване и съответно критичен размер на клъстера от атоми/молекули (критичният размер зависи от свободната енергия на повърхността и степента на пресищане); Мобилността на адатомите; Температурата на подложката и енергията и ъгъла на падане на пристигащите частици от т.нар. матерна фаза. Би било добре да се споменат още тук в тази глава и механизмите на растеж на тънки филми:

а) Режим на послоен растеж (Frank–van der Merwe), когато атомите запълват равномерно повърхността, слой след слой и се получават гладки и хомогенни филми; б) островен растеж (Volmer–Weber), когато се формират триизмерни острови (кълъстери), които сливат по-късно и с) слоесто-островен растеж (Stranski–Krastanov), където първо се образуват един или няколко монослоя, след което започва островен растеж. Вместо това, авторът се „хвърля“ веднага в описание на по-специфични параметри и условия, използвани в проведените експерименти. Разбира се, това не лошо, но „разказът“ в дисертационния труд може да върви и по-гладко. Тук е мястото да направя и много сериозна забележка по отношение на част от използваната терминология и забележката ми е както към кандидата, така и към научните му ръководители. Категорично не мога да приема използването на думата „субстрат“ вместо „подложка“, а използването на думата „нуклеация“ вместо „зародишообразуване“ е недопустимо. Интересно е, че в докторска дисертация, която рецензирах преди около година на докторант от Софийски университет бяха установени абсолютно същите фразеологични „грешки“, което поставя въпроса за използването и обучаването на използваната правилните термини. Относно зародишообразуването и механизмите на кристален растеж бих препоръчал на докторанта да се запознае с книгата *Crystal Growth for Beginners: Fundamentals of Nucleation, Crystal Growth and Epitaxy* (3rd ed.) с автор: Ivan Markov, издателство World Scientific Publishing Company (2017). Направен е анализ на условия за формиране на твърди покрития с нанокристална структура, на размерите на зърната (кристали) и на наличието на дефекти (дислокации, пукнатини и пори). Описан е класа от методи за физичното отлагане на тънки слоеве (PVD), описан е метода на магнетронно разпрашване и на катодно-дъгово изпарение. Изложението продължава с описание на основните методи за изследване на покрития, а именно: определяне дебелината на отложените покрития, изследване на механичните свойства (определяне силата на адхезия, измерване на твърдост), изследване на топографията на повърхността, състава и структурата на покритията (сканираща електронна микроскопия и енергийнодисперсивен елементен анализ, рентгенова фотоелектронна спектроскопия, рентгеноструктурен анализ), изследване на трибологичните свойства и изследване на температурната стабилност. Като цяло основните методи са описани добре, въпреки това имам забележки, едната от които е, че всички фигури са копирани от други източници (разбира се, с позоваване), а другата е относно изписването на често използвания символ за градус (ъгъл) и градус Целзий, който се изписва с кръгче в горен индекс вместо използвания символ от автора „нула“. Тези бележки се отнасят единствено до форматирането и пригледността на текста, а не са по същество на изложението. По отношение на уравнение (1), страница 37 имам въпрос дали с P е означено налягане или сила и съответно в какви единици се измерва твърдостта, тъй като ако P е налягане, така както е записано, излиза, че имаме размерност [сила/разстояние²]*4)?

По-съществената част от дисертацията започва с Глава 2 – Материали и методи и съответно емпирична база на проведеното изследване. Коментиран е избора на състав на нанокмпозитните покрития с модулиран състав, които следва да бъдат синтезирани/получени и изследвани. Дисертантът се насочва към комбинирането на по-твърди с по-еластични, подслоеве, включени в състава на многослойното покритие,

което предполага постигане на желаните параметри свръхтвърдост и повишена якост, чрез отклоняване на пукнатини през интерфейсните зони, причинявайки разсейване на енергия без разрушаване на покритието. За да се изследва влиянието на периода на модулация върху свойствата на разработваните нанокompозитни многослойни структури са отложени две групи покрития. При първата група покритието се състои от 3 периода (ml3-TiAlSiN/AlSiN), тъй като това е минималният брой периоди на модулация, за да се проявят предимствата на мултислойната архитектура. За втората група имаме 30 периода (ml30-TiAlSiN/AlSiN), т.е. достатъчно голям брой периоди спрямо този в първата група, за да се изявят ефекти, които се обуславят от по-големия брой интерфейси (границы) в структурата. Описана е подробно и процедурата по предварителна подготовка на образците. Главата продължава с описание на използваното оборудване за нанасяне на нанокompозитни покрития с модулиран състав. За постигане на избрания състав на покритията, в системата са използвани и монтирани катода Ti (99,99 wt.%) и сплавен AlSi (82 at.% Al, 18 at.% Si). За закрепване на образците е използвана триосна двустъпална планетарна система. Чрез резистивен нагревател, разположен на трите страни на камерата, може да се постига температура до 600 °C при нанасяне на покритията. В детайли е описана и разработената технология за нанокompозитни покрития с модулиран състав - отлагане на референтни еднослойни покрития при различна продължителност и съответно измерване на дебелина, определяне на скорости на израстване, както и определяне на времената за отлагане на всеки функционален подслой в многослойните структури. Описани са и технологичните параметри на процеса на отлагане при катодно-дъгово изпарение. Главата продължава с описание на оборудването и методиките за изследване на нанокompозитни покрития с модулиран състав, което е разширение на по-рано описание на основните методи за изследване на покрития, а именно: определяне дебелината на отложените покрития, изследване на механичните свойства (определяне силата на адхезия, измерване на твърдост), изследване на топографията на повърхността, състава и структурата на покритията (сканираща електронна микроскопия и енергийнодисперсивен елементен анализ, рентгенова фотоелектронна спектроскопия, рентгеноструктурен анализ), изследване на трибологичните свойства и изследване на температурната стабилност.

Същинската част от дисертацията започва с Глава 3, където са представени и дискутирани получените резултати. Тази глава започва с представяне на резултатите по отношение на морфологията и елементния състав на отложените референтни (еднослойни – single layer) sl-TiAlSiN и sl-AlSiN и разработени многослойни (multilayer) ml3- TiAlSiN/AlSiN и ml30-TiAlSiN/AlSiN покрития. Използвана е сканираща електронна микроскопия с енергийно-дисперсивен елементен анализ и рентгенова дифракция в комбинация с рентгенова фотоелектронна спектроскопия – изследванията са направени както на повърхността, така и по профил в дълбочина. Напречните сечения ясно илюстрират архитектурата на покритията. Светлите и тъмните слоеве съответстват на подслоевите от периода TiAlSiN и AlSiN. Морфологията на напречните сечения разкрива плътна структура. Самите напречни сечения са получени с добра точност на изработката, без замърсявания и са като цяло гладки. Със задоволителна точност е показано и разпределението на елементите по дълбочина на покритията. Резултатите от рентгеновата дифракция показват, че промяната в периода на модулация не води до промяна в позициите на дифракционните пикове, но влияе върху техния интензитет. Определен е среден размер на кристалитите 12 nm за ml3-TiAlSiN/AlSiN покритие и от 13 nm за ml30-TiAlSiN/AlSiN. Направена е оценка на количествата на двете фази, която дава

приблизително 28 mass% Ti(Al)N и 72 mass% Al(Si)N в ml3-TiAlSiN/AlSiN и около 15 mass% Ti(Al)N и 85 mass% Al(Si)N в ml30-TiAlSiN/AlSiN, като доминирането на фазата Al(Si)N в многослойните покрития е в съответствие с резултатите, получени от EDS измерванията. Като цяло, рентгеноструктурният анализ на разработените покрития показва, че е образувана нанокомпозитна структура и е постигнато намаляване на размера на зърната в резултат на високото съдържание на силиций. Показано е, че са образувани твърди разтвори на съединенията TiAl(Si)N и AlSiN. Тяхното наличие показва, че разработените многослойни покрития се състоят от нанокомпозитни подслоеви, а това е предпоставка за висока стабилност на твърдостта при високи температури. В допълнение XPS анализът установява, че в разработените многослойни покрития съществуват три вида връзки (Ti-N, Al-N и Si-N). По-силните Ti-N връзки определят твърдостта на покритията, докато по-слабите Al-N връзки подобряват тяхната еластичност. По-силните Ti-N и по-слабите Al-N връзки допринасят основно за твърдостта и еластичността на покритието. Трета глава продължава с изследване на влиянието на температурата върху морфологията, състава и структурата на ml3-TiAlSiN/AlSiN и на ml30-TiAlSiN/AlSiN покритията. Установено е, че термичното третиране до 900 °C не причинява промени в структурата на покритията. Не са наблюдавани пукнатини или „лющение“ на интерфейсите, което показва наличие на достатъчно силни кохезивни сили до температури от 900 °C. Същото се отнася и за елементния състав на покритията. Без да се спирам на подробните описания в оставащата част от тази глава, изводът, който може да бъде направен е, че в резултат на подходящия многослоен дизайн и разработената подходяща технология, е постигната структура, съчетаваща предимствата на нанокомпозитите и многослойните покрития, която предполага комбинация от свръхтвърдост с подобрена еластичност.

В следващата глава 4 са обобщени резултатите от изследване на механичните и трибологичните свойства на покритията. Определена е дебелината на покритията. Механичните и трибологични свойства включват изследване на твърдост, модул на еластичност, устойчивост на еластично въздействие и пластична деформация, както и еластично възстановяване. Получените стойности на твърдостта определят разработените покрития като свръхтвърди. Колкото по-висока е твърдостта, толкова по-висока е устойчивостта на пластична деформация. Свръхтвърдостта обаче обикновено е свързана с голям модул на еластичност, което прави покритието крехко. За да се избегне това противоречие, е необходим малък модул на еластичност, който допринася външните натоварвания да се разпределят върху по-голяма площ. Получените стойности за модулите на еластичност могат да се приемат за ниски за тези свръхтвърди покрития. Така, комбинацията от свръхтвърдост с нисък модул на еластичност показва подобрена жилавост на покритието. В детайли са описани експериментите по трибологичните свойства и измерване на коефициента на триене и определяне на степента на износване. От получените резултати се вижда, че покритието ml30-TiAlSiN/AlSiN, което притежава по-голям брой интерфейси в крайна сметка показва по-добра износоустойчивост. Детайлно са изследвани и следите от износване по отношение на отлепвания и остатъци в двата края на пътеките, определени са и механизмите на износване в двете покрития. Определените твърдости и адхезионна здравина на двете многослойни покрития, предполагат по-добро трибологично поведение на ml3-TiAlSiN/AlSiN, но получените резултати от коефициентите на триене, морфологията на износване и степента на износване показват обратното. Целият описан

комплекс от изследванията е приложен и върху отгряти покрития. Добро впечатление прави детайлното сравнение и обосновка на направените изводи. Като основен извод може да се посочи, че периодът на модулация влияе различно върху поведението на покритието при повишени температури поради разликата в доминиращите механизми на износване. В заключението на дисертацията е посочено обобщение на резултатите. Спокойно може да се каже, че резултатите от работата по дисертационния труд показват, че поставената цел е постигната напълно успешно. Разработено е свръхтвърдо нанокомпозитно износоустойчиво покритие TiAlSiN/AlSiN, което е устойчиво при температури до 900 °C. Изследването на механичните и трибологичните свойства на покритията с различни периоди на модулация в зависимост от температурата на третиране установи, че три-периодното TiAlSiN/AlSiN покритие е по-подходящо за високотемпературни приложения. Това го характеризира като многофункционално и приложимо в различни области на индустрията, включително и при „сухо“ машинно обработване.

VI. Въпроси, препоръки и забележки:

Забележките могат да се разделят на две: едните касаят единствено формални неща, свързани с форматиране и структуриране на дисертационния труд, където е било необходимо малко по-голямо внимание към детайла по отношение на това как изглежда крайния, завършен научен продукт, включително допускането на неволни правописни грешки; вторият тип забележки могат да бъдат отнесени към начина на „разказване / написване“ и стил на дисертационния труд, но това е процес, който докторантът, убеден съм, ще съумее да подобри в бъдещата си работа. Надявам се докторантът да продължи своята научна дейност в Лабораторията за в бъдеще.

VII. Оценка на автореферата:

Авторефератът е изготвен в съответствие с утвърдените изисквания и отразява основните резултати от дисертационния труд по ясен и систематичен начин. При изготвянето му е спазена практиката за повторение на номерацията на графики и таблици, идентична с тази в самата дисертация, което улеснява ориентирането на читателя и създава пряка връзка между двата документа. Единствено се наблюдава минимално разминаване в номерацията на едно-две уравнения, но този факт не оказва съществено влияние върху разбирането на изложението и може да се приеме като несъществен.

Авторефератът изпълнява основната си функция – да предостави възможност за бърз и цялостен преглед на съдържанието на дисертацията, като представя в синтезиран вид методологията, получените резултати и направените изводи. Същевременно той не допуска съществени пропуски или изкривявания на съдържанието, а напротив – запазва пълнотата и логическата последователност на основния труд.

VIII. Заключение:

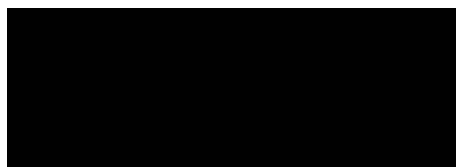
Като имам предвид нивото и обема на проведените научни изследвания, както и високото качество на дисертационния труд и ясно изразените научни и научно-приложни приноси на докторанта, изразявам своето убедено положително становище.

Смятам, че дисертационната работа отговаря на всички изисквания за оригиналност, научна стойност и методологична коректност, характерни за труд, претендиращ за придобиване на образователната и научна степен „доктор“.

В този контекст считам, че представените резултати и изводи са с висока значимост за развитието на изследванията в областта на физиката на кондензираната материя и демонстрират самостоятелността и зрялостта на изследователския подход на автора.

Ето защо убедено предлагам на почитаемото Научно Жури да присъди образователната и научна степен „доктор“ на **Стефан Димитров Колчев** по професионално направление 4.1. Физически науки, докторска програма „Физика на кондензираната материя“.

Изготвил рецензията:



проф. д-р Богдан Рангелов,
Институт по физикохимия, БАН

05/09/2025