



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TARGOVISTE
IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT
STRATURI SUBȚIRI NANOMETRICE PENTRU
ÎMBUNĂȚĂȚIREA CARACTERISTICILOR
TRIBOLOGICE ALE COMPONENTELOR
MECATRONICE

SUMMARY OF THESIS
NANOMETRIC THIN LAYERS FOR IMPROVING
THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF
MECATRONIC COMPONENTS

CONDUCĂTOR DE DOCTORAT,

Prof. Univ. Dr. Ing. EurIng. D.H.C. Gheorghe I. GHEORGHE

Doctorand,

Valentin GORNOAVA

Târgoviște

Anul 2020



CUPRINS

CAPITOLUL I. NOȚIUNI FUNDAMENTALE.....	1
CAPITOLUL II. METODE MECATRONICE INTELIGENTE PENTRU DEPUȘURI DE STRATURI SUBȚIRI.....	4
CAPITOLUL III. STUDIUL PROCEDURAL AL METODELOR ȘI PROCEDEELOR DE CARACTERIZARE.....	6
CAPITOLUL IV. PROCEDURI MECATRONICE INTELIGENTE APLICATE ÎN CERCETĂRI EXPERIMENTALE.....	8
4.1.CERCETĂRI EXPERIMENTALE PENTRU MATERIALE CU STRUCTURI MICRO ȘI NANOMETRICE.....	8
4.2. DETERMINAREA GROSIMII STRATURILOR DEPUȘURI.....	10
4.3. CARACTERIZAREA STRUCTURALĂ A STRATURILOR DEPUȘURI.....	11
4.4. DETERMINAREA DURITĂȚII STRATURILOR SUBȚIRI DEPUȘURI.....	18
4.5. DETERMINAREA ADERENȚEI STRATURILOR SUBȚIRI DEPUȘURI.....	20
CAPITOLUL V. MATERIALE ȘI ECHIPAMENTE FOLOSITE PENTRU TESTAREA FILMELOR SUBȚIRI ÎN SISTEME MECATRONICE REALE.....	26
5.1.CARACTERIZAREA TOPOGRAFICĂ A COMPONENTELOR MECATRONICE REALE.....	27
5.1.1.Caracterizarea topografică a componentelor mecatronice testate.....	27
5.1.2.Caracterizarea topografică a straturilor subțiri depuse pe componentele mecatronice reale.....	32
5.2.DETERMINAREA DIAMETRULUI COMPONENTELOR TESTATE.....	37
5.3.APLICĂȚII INDUSTRIALE ALE REZULTATELOR CERCETĂRII.....	39
CAPITOLUL VI CONCLUZII. CONTRIBUTII PERSONALE SI DIRECTII DE CONTINUARE A CERCETĂRIILOR.....	41
6.1 CONCLUZII.....	42
6.2 DIRECȚII NOI ÎN CERCETARE.....	44

Cuvinte cheie: High-tech, filme subțiri, uzura, materiale nanostructurate

CAPITOLUL I. NOȚIUNI FUNDAMENTALE

Aplicațiile mecatronice integrează principiile fizicii, chimiei, matematicii și pe cele ingineresti, creează concepte fundamentale și cunoștințe de la nivel de componente până la nivel de sisteme și dezvoltă noi produse, materiale, procese și produse informatice.

Obiectivul principal al tezei îl reprezintă studiul materialelor utilizate pentru acoperiri cu filme subțiri a componentelor metalice din cuplele de frecare, utilizate cu precădere în aplicații mecanice și mecatronice (angrenaje de mare precizie în construcții miniaturizate, lagăre de mare precizie, componente ale echipamentelor mecatronice pentru măsurare, poziționare și reglare: căi de rulare, ghidaje, grippere, etc., componente pentru echipamente biomedicale, MEMS & NEMS), pentru prelungirea duratei de viață a acestora și îmbunătățirii caracteristicilor tehnico-funcționale.

Aceste informații despre materiale sunt ulterior utilizate, astfel încât să contribuie la realizarea de materiale finite necesare sau cerute de societate, lucru de care se ocupă ingineria materialelor.

Ingineria suprafețelor oferă modalitatea de a reduce uzare în diferite cuple, factorii care influențează această reducere sunt:

- creșterea durabilității;
- chimie a suprafeței diferite care să reducă frecarea adezivă;
- componente acoperite care rămân neuzate.
- etc.

Pentru obținerea acestor materiale cu proprietăți îmbunătățite, care să poată fi utilizate în diferite domenii pentru aplicații variate s-au încercat diferite metode, însă cea mai importantă, până în prezent, este **depunerea de straturi subțiri**.

Filmele subțiri cu structuri micro și nanometrice depuse prin metode mecatronice high-tech pot fi utilizate în domenii precum mecatronica (componentele structurilor mecatronice), electronică, medicină (implanturi – proteze dentare, ortopedice), etc. Există o întreagă industrie de înaltă tehnologie pentru depuneri de materiale, micro și nanostructurate, ca urmare a tendinței generale de miniaturizare a produselor odată cu creșterea fiabilității. S-au realizat studii și progrese prin folosirea unor aliaje și materiale foarte dure pentru a menține uzura la valori minime.

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

Uzura scade pronunțat cu creșterea rezistenței la fisurare a suprafețelor. Astfel, problematica dezvoltării de materiale cu caracteristici superioare de rezistență mecanică ridicată și uzură redusă constituie o permanență a cercetărilor actuale din domenii industriale și de cercetare diverse.

De caracterizarea suprafețelor materialelor depuse a produselor utilizate în variate domenii, precum mecatronică, electronică, medicină, etc. depinde bună funcționare, durabilitatea și fiabilitatea operațională a acestora.

Echipamentele și metodele utilizate în caracterizarea suprafețelor oferă informații referitoare la:

- topografia straturilor subțiri depuse;
- caracteristicile fizico-mecanice ale straturilor depuse (microduritate, caracteristici electrice, termice, magnetice, aderența, etc.);
- caracteristici structurale ale filmelor subțiri depuse.

De aceea, principalul obiectiv al tezei este **caracterizarea suprafețelor filmelor subțiri cu structuri micro și nanometrice** depuse prin diferite metode fizice și chimice și destinate aplicațiilor mecatronice.

Din multitudinea de materiale din care se realizează componentele mecatronice, **se vor depune straturi subțiri micro/ nanostructurate pe substraturi de oțel**, care le pot îmbunătăți calitatea

Se vor folosi **substraturi** precum:

- **OLC45** utilizat în industria mecanică și mecatronică pentru producerea de joje, bușe, elemente de acționare, cepi de măsurare, cepi de contrare, suport de poziționare, corp joja, etc.;
- **Rul 1** utilizat în industria mecanică și mecatronică pentru producerea scule, rulmenți etc.
- **C120** utilizat în industria mecanică și mecatronică pentru producerea de calibre filetate și lise, capete palpator, etaloane, poansoane, etc;
- **OSC** utilizat în industria mecanică și mecatronică pentru producerea de calibre filetate și lise, capete palpator, etaloane, poansoane etc.

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

S-au ales aceste materiale de depunere în substraturi datorită importanței pe care le au în inginerie, fiind create componente mecatronice care sunt supuse, în timp, uzurii.

Rezultatele acestor cercetări, în special cele tribologice, ar putea fi extrem de utile inginerilor din domeniul mecatronic, care analizează condițiile de funcționare a pieselor / componentelor mecanice din ansamblu și stabilește funcția fiecăreia, alegând materialele care corespund funcționării corecte a acestora.

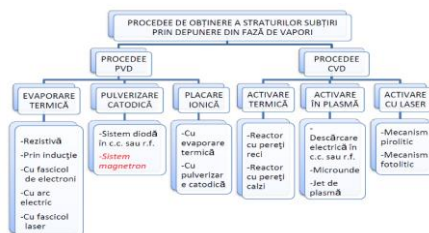
CAPITOLUL II. METODE MECATRONICE INTELIGENTE PENTRU DEPUNERI DE STRATURI SUBȚIRI

Metodele de depunere trebuie să țină cont de natura fenomenelor care au loc în procesul de depunere, de diversitatea parametrilor de formare a filmelor (compoziție, structură, grosime, răspândirea componentelor în volum) și de parametrii de utilizare ale acestora (aderența, rezistența la uzură, rezistența la coroziune, porozitate).

Procedeele de depunere a straturilor subțiri constituie părți componente ale metodelor de depunere care folosesc aceleași fenomene fizico-chimice, dar care se deosebesc între ele prin anumiți parametri ai procesului de depunere, care duc la modificarea unor parametri de formare sau de utilizare a depunerilor. Depunerea de straturi subțiri este folosită la fabricarea straturilor izolatoare, a straturilor semiconductoare, a straturilor metalice, etc.

Metodele de obținere a straturilor subțiri prin depunere din fază de vapori sunt fizice (Physical Vapor Deposition – PVD) și chimice (Chemical Vapor Deposition – CVD). Diversele variante ale acestor metode sunt prezentate în Figură 1

Figura 1. Clasificarea principalelor procedee de obținere a straturilor din faza de vapori.



Peliclele subțiri depuse prin procese PVD și CVD au structuri și compoziții extrem de variate pentru a satisface o gamă cât mai largă de aplicații. Prima diferență între CVD și PVD este că într-un proces CVD reacția are loc la suprafață, iar în procesul PVD reacția are loc în atmosferă și compusul este apoi depozitat pe suprafață. În comparație cu procedeele CVD, procedeele PVD permit obținerea de straturi la temperaturi mai scăzute, într-o varietate microstructurală și compozițională mult mai mare. În plus procedeele PVD nu poluează mediul.

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

În cadrul **aplicațiilor din cadrul tezei de doctorat** , materialul pe care voi face depunerea stratului trebuie să țină cont de condițiile funcționale impuse de piesa finită în anumite situații materialele pentru depunere pot fi alese, când am ales materialul a trebuit să țin seama de compatibilitatea materialelor pentru a asigura o aderență optimă. Pentru a avea o aderență foarte bună a substratului, suprafața probei trebuie prelucrată, prin îndepărtarea impurităților după piesa este spălată în medii lichide, rugozitatea se reduce prin șlefuire sau polizare.

CAPITOLUL III. STUDIUL PROCEDURAL AL METODELOR ȘI PROCEDEELOR DE CARACTERIZARE

Se propune o prezentare analitică în concepția mea a procedurilor / procedeeleor / metodicilor aplicabile în cercetările experimentale de laborator pentru caracterizarea fizico-mecanica, structurală și a topografiei superficiale la structurile micro și nanometrice de acoperire.

Având în vedere domeniul de aplicabilitate considerat pentru micro și nano structurile de acoperire – domeniul mecatronic – cunoașterea parametrilor funcționali, a structurilor, stratului de bază și al acoperirilor, al gradului de finisare superficială a depunerii aplicate, sunt foarte importante pentru realizarea obiectivului.

O rezistență mecanică adecvată a substratului, o structură ultra-fina a depunerii și un grad ridicat de aderență a acestuia, vor conduce la asigurarea unei funcționari corespunzătoare a cuplului de frecare unde sunt utilizate prin compatibilitate și regim tribologic optim.

Este necesar ca materialele metalice, ceramice și alte compozite utilizate ca substraturi să realizeze un maximum de duritate asociat unei tematici corespunzătoare, complex de caracteristici ce impun structuri metalografice foarte fine, până la nivel nanometric în cazul ceramicelor.

Rezistența mecanică maximă în condițiile unor particularități tribologice optime necesare straturilor de acoperire și al asigurării unei aderențe superioare se obțin, de asemenea, prin intermediul unor depuneri nanostructurate.

În funcție de particularitățile de exploatare urmărite, procedurile / procedeele / metodele de caracterizare sunt diversificate. Corespunzător, echipamentele pentru încercări sunt și ele diversificate: pentru o singură caracteristică sau pentru multiple caracteristici, cu grade tot mai ridicate de precizie și nivele de încredere mari, cu sau fără echipare informatică, etc.

Spre exemplificare se poate prezenta situația inspecțiilor pentru caracterizare imagistică: de la microscopie optică la microscopie electronică și, mai recent, microscopie de forță atomică sau diferite combinații între acestea.

De asemenea, rezultatele încercărilor experimentale sunt prelevabile cu echipamente mecatronice, stocate și / sau interpretate cu programe software dedicate,

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

complexe, conținând și o prelucrare statistică, de interpolare pentru comparare cu parametric stocați în baze de date.

În cadrul lucrării analiza procedurală efectuată pentru obiective țintă preliminate va prezenta:

- principalele tipuri de încercări procedurale aplicabile;
- procedurile/metodele selectate pentru cercetările experimentale și motivațiile obținuturilor.

**CAPITOLUL IV. PROCEDURI MECATRONICE INTELIGENTE
APPLICATE IN CERCETARI EXPERIMENTALE**

4.1. Cercetari experimentale pentru materiale cu structuri micro si nanometrice

Dintre toate metodele existente si studiate in etapele de pana acum ale tezei am realizat si experimentat printr-o procedura mecatronica originala depuneri prin evaporare cu fascicul de electroni. Aceasta este o tehnica ce realizează depuneri de straturi subțiri metalice.

Depunerile prin evaporare cu fascicul de electroni au fost realizate in **Laboratorul de Caracterizare si Structurare la Scara Nanometrica** din cadrul **Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Microtehnologie– IMT din București** cu un sistem Temescal FC-2000 (Figura 2), un sistem de evaporare versatil care acceptă o varietate de accesorii pentru a satisface aproape orice cerință. Acest sistem combina flexibilitate maximă cu ușurința de utilizare. FC-2000 este un sistem care permite ca sursa sa rămână în vid în timpul reîncărcării substratului, are un ciclu rapid, încărcare blocata.

Figura 2. Sistem de depunere prin evaporare cu fascicul de electroni Temescal FC-2000.



Componentele acestui sistem sunt: sursa de fascicul de electroni, sistemul de control, pompare în vid și control, sistem apă sursă de alimentare, cameră vid., sistem aer, , Sistemul de control al Temescal (TCS) prevede procesul de control complet integrat, bazat pe rețeta și în vid. Funcționând în oricare dintre aceste moduri protejate cu parolă, TCS oferă, de asemenea, procesul de monitorizare variabilă, proces de urmărire tendință și procesul de arhivare a datelor.

Modul automat TCS oferă executarea complet automatizată de rețete programate de utilizator compuse, de până la douăzeci de pași de proces. Acesta

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

oferă, de asemenea, operațiuni independente de autopompare și autoventilare și testare automată a ratei de creștere.

Modul manual TCS permite utilizatorului să seteze parametrii de proces, să exploateze componente și subsisteme majore individual cu protecție completă de blocare și să execute procese neautomate de depunere a unui singur film.

Modul de operare de servicii TCS oferă control la nivel scăzut, de blocare asupra oricăror valve, pompe, motoare sau surse de alimentare ale sistemului.

Sursele de fascicul de electroni ale Temescal oferă comoditate și fiabilitate îmbunătățite și transfer în aplicații variind de la producția de microelectronice și optice la acoperirea specializată.

Cheia pentru aceste îmbunătățiri de performanță este acoperirea creuzetului acționat pneumatic, care se ridică automat înainte de rotația pentru depozite înalte, dar care etanșează toate părțile creuzetului de la cel expus și unul de altul. Beneficiul net este eliminarea virtuală a contaminării încrucișate.

Controlerul minuțios al fasciculului de electroni al Temescal oferă operare complet digitală, stocare internă de până la 64 de modele definite de utilizator și compatibilitate cu aproape orice tun de fascicul de electroni disponibil comercial.

Cu soft-uri de programare bazate pe Windows™ și un controler cu telecomandă de mână, acesta oferă precizia și flexibilitatea cerută de cele mai exigente procese PVD cu fascicul de electroni.

Utilizând depunerea prin evaporare cu fascicul de electroni au fost depuse straturi de Ti, Cr, Al și multistrat Ti/Al pe patru tipuri de probe de oțel: OLC45, Rul1, C120 și OSC (Figura 3).

Figura 3. Substraturi de oțel pe care au fost depuse straturi metalice nanometrice utilizând evaporarea cu fascicul de electroni: (a) OLC45; (b) Rul1; (c) C120; (d) OSC.



4.2. Determinarea grosimii straturilor depuse

Pentru determinarea grosimii straturilor subțiri depuse s-a folosit metoda microbalanței cu cristal de cuarț (QCM). Măsurătorile au fost realizate în **Laboratorul de Caracterizare și Structurare la Scara Nanometrică din cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Microtehnologie – IMT din București.**

Metoda microbalanței cu cristal de cuarț (QCM) poate fi utilizată sub vid, în fază gazoasă ("senzor de gaz") și, mai recent, în medii lichide. Este utilă pentru monitorizarea vitezei de depunere în sistemele de depunere filme subțiri sub vid. În lichid, este foarte eficientă în determinarea afinității moleculelor (proteine, în special) la suprafețe funcționând cu situ-ri de recunoaștere. Entitățile mai mari, cum ar fi virusurile sau polimerii sunt investigate, la fel de bine. Metoda microbalanței cu cristal de cuarț (QCM) a fost utilizată de asemenea pentru a investiga interacțiunea dintre biomolecule.

Măsurătorile de frecvență sunt ușor făcute cu precizie ridicată, prin urmare, este ușor de măsurat densități de masă până la un nivel de sub $1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Pe lângă măsurarea frecvenței, factorul de disipare (echivalent cu lățimea de bandă de rezonanță) este adesea măsurat pentru a ajuta la analiza. Factorul de disipare este factorul de calitate inversa a rezonanței, $Q^{-1} = w / fr$; cuantifică amortizarea din sistem și este în legătură cu proprietățile vâscoelastice ale eșantionului.

Cuarțul este membru al familiei de cristale care generează efectul piezoelectric. Efectul piezoelectric s-a găsit aplicații în sursele de mare putere, senzori, elemente de acționare, standarde de frecvență, motoare, etc., iar relația dintre tensiunea aplicată și deformarea mecanică este bine cunoscută; acest lucru permite o sondare de rezonanță acustică prin mijloace electrice. Prin aplicarea

curentului alternativ pe cristalul de cuarț se vor induce oscilații.

Factorul Q, care este raportul dintre frecvență și lățime de bandă, poate ajunge la 106. O astfel de rezonanță îngustă duce la oscilatoare foarte stabile și o mare precizie în determinarea frecvenței de rezonanță. QCM exploatează această ușurință și precizie de detectare.

4.3. Caracterizarea structurală a straturilor depuse

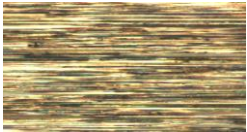
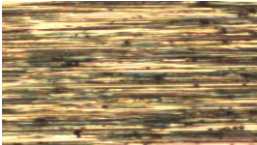
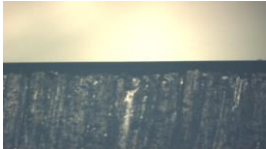
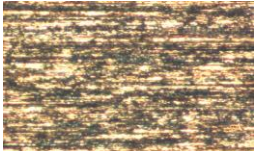
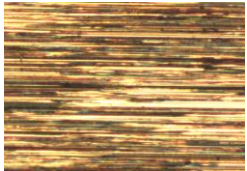
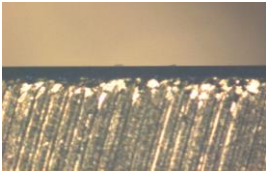
Folosind microscopul de forță atomică din dotarea **Laboratorului MEMS & NEMS Mecatronice Nanometrice** din cadrul „**Institutului National de Cercetare Dezvoltare pentru Mecatronica și Tehnica Măsurării – INCDMTM București**” am analizat caracterizarea structurală a straturilor nanometrice. Prin înregistrarea devierilor mici ale cantileverului elastic poate fi făcută achiziția unei topografii de suprafață AFM (Figura 4). Legenda : 1 – unitate de bază; 2 – cap de măsură; 3 – sistem de izolare a vibrațiilor; 4 – sistem optic de vizualizare.

Figura 4. Microscop AFM, NTEGRA Probe NanoLaboratory NT – MDT, Moscova, Rusia.



**Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice
ale componentelor mecatronice**

Tabel 1. Caracterizarea experimentală la nivel microscopic a filmelor subțiri depuse pe
substratul de oțel tip OLC45 , Rul 1, C120, OSC

Vizualizare film subțire depus utilizand camera CCD a AFM NTEGRA	Vizualizare limita de imbinare substrat metalic - film subțire depus
1	2
 Al_50 nm	 Al_50 nm
 Cr_50 nm	 Cr_50 nm
 Ti_100 nm	 Ti_100 nm
 Ti_Al_50_50 nm	 Ti_Al_50_50 nm

În conformitate cu caracterizarea experimentală se poate observa că toate straturile depuse au o uniformitate rezultată în urma procesului, însă, la nivel microscopic, toate par a avea o suprafață nu foarte plană (ar putea avea și o rugozitate ridicată). De asemenea, din imaginile obținute în urma analizei microscopice a probelor se poate observa și îmbinarea completa între strat și substrat.

În urma observațiilor microscopice utilizând camera CCD a AFM NTEGRA, pentru o mai bună caracterizare a straturilor au fost realizate scanări cu ajutorul microscopului de forță atomică, care permite caracterizarea suprafețelor până la nivel nanometric. În urma scanării unor suprafețe de $50 \times 50 \mu\text{m}$ de pe diferitele filme depuse pe toate substratele, au putut fi analizați diferiți parametrii topografici (rugozitate, asimetria suprafeței, coeficient de aplatizare), care oferă informații legate de distribuția stratului depus.

Parametrii topografici în urma studiului AFM (asimetria suprafeței R_{sk} coeficient de aplatizare R_{ka} , înălțimea maximă h_{max} , înălțimea în 10 puncte R_z , asimetria suprafeței R_{sk} , rugozitate R_a) care pot fi determinați oferă informații legate de suprafața acestora.

Rugozitatea a fost folosită atât pentru a determina abaterile (o suprafață netedă prezintă abateri mici, o suprafață aspră prezintă abateri mari), pentru a obține informații despre deteriorarea și uniformitatea stratului nanometric depus.

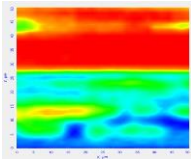
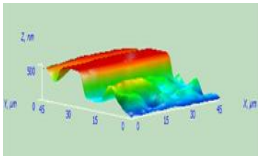
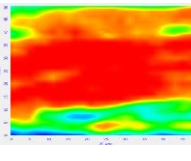
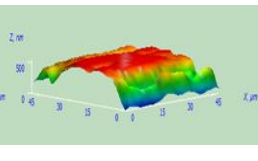
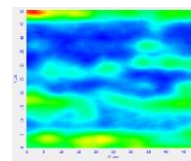
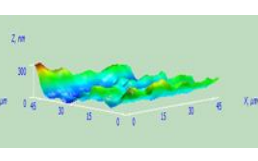
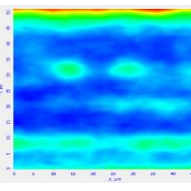
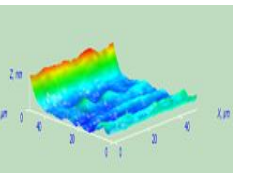
Evaluarea gradului de asimetrie a unei repartii este dat de indicele R_{sk} , iar aplatizarea este dată de indicele R_{ka} , indicele de asimetrie R_{sk} poate să fie pozitiv sau negativ, totul depinde de repartitia de sondaj dacă este asimetrică spre dreapta respectiv stanga, dacă distribuția este simetrică atunci asimetria este nulă.

Indicele de aplatizare R_{ka} determină forma unei distribuții, indicele de aplatizare mic ne indică o repartie în care sunt prezente mai puține categorii depărtate de medie, indicele de aplatizare mare ne indică o repartie cu „cozi” mari, dacă este foarte apropiată de normal vom avea un coeficient de aplatizare în jurul valorii 3.

În tabelul următor (Tabelul 2) sunt prezentate câteva dintre rezultatele obținute în urma caracterizării prin microscopia de forță atomică a straturilor subțiri de multistrat Ti/Al, Cr, Al, Ti și, depuse pe substraturile de oțel tip OLC45, Rul1, C120 și OSC și calcularea parametrilor topografici determinați folosind AFM-ul NTEGRA și softul său inclus.

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

Tabel 2. Caracterizarea experimentală pe AFM a suprafețelor filmelor subțiri depuse pe
substratul de oțel OLC45 , Rul 1, C120, OSC

Al ₅₀ nm																												
1	2	3																										
		<table><tr><td>Amount of sampling</td><td>2601</td></tr><tr><td>Max</td><td>536.278 nm</td></tr><tr><td>Min</td><td>0 nm</td></tr><tr><td>Peak-to-peak, Sy</td><td>536.278 nm</td></tr><tr><td>Ten point height, Sz</td><td>289.439 nm</td></tr><tr><td>Average</td><td>321.625 nm</td></tr><tr><td>Average Roughness, Sa</td><td>171.033 nm</td></tr><tr><td>Second moment</td><td>363.944</td></tr><tr><td>Root Mean Square, Sq</td><td>182.538 nm</td></tr><tr><td>Surface skewness, Ssk</td><td>-0.0904733</td></tr><tr><td>Coefficient of kurtosis, Sku</td><td>-1.63431</td></tr><tr><td>Entropy</td><td>6.36808</td></tr><tr><td>Redundance</td><td>-9.28039</td></tr></table>	Amount of sampling	2601	Max	536.278 nm	Min	0 nm	Peak-to-peak, Sy	536.278 nm	Ten point height, Sz	289.439 nm	Average	321.625 nm	Average Roughness, Sa	171.033 nm	Second moment	363.944	Root Mean Square, Sq	182.538 nm	Surface skewness, Ssk	-0.0904733	Coefficient of kurtosis, Sku	-1.63431	Entropy	6.36808	Redundance	-9.28039
Amount of sampling	2601																											
Max	536.278 nm																											
Min	0 nm																											
Peak-to-peak, Sy	536.278 nm																											
Ten point height, Sz	289.439 nm																											
Average	321.625 nm																											
Average Roughness, Sa	171.033 nm																											
Second moment	363.944																											
Root Mean Square, Sq	182.538 nm																											
Surface skewness, Ssk	-0.0904733																											
Coefficient of kurtosis, Sku	-1.63431																											
Entropy	6.36808																											
Redundance	-9.28039																											
Cr ₅₀ nm																												
		<table><tr><td>Amount of sampling</td><td>2601</td></tr><tr><td>Max</td><td>564.278 nm</td></tr><tr><td>Min</td><td>0 nm</td></tr><tr><td>Peak-to-peak, Sy</td><td>564.278 nm</td></tr><tr><td>Ten point height, Sz</td><td>286.076 nm</td></tr><tr><td>Average</td><td>445.671 nm</td></tr><tr><td>Average Roughness, Sa</td><td>112.162 nm</td></tr><tr><td>Second moment</td><td>470.362</td></tr><tr><td>Root Mean Square, Sq</td><td>137.972 nm</td></tr><tr><td>Surface skewness, Ssk</td><td>-1.23697</td></tr><tr><td>Coefficient of kurtosis, Sku</td><td>0.378966</td></tr><tr><td>Entropy</td><td>5.8896</td></tr><tr><td>Redundance</td><td>-8.12413</td></tr></table>	Amount of sampling	2601	Max	564.278 nm	Min	0 nm	Peak-to-peak, Sy	564.278 nm	Ten point height, Sz	286.076 nm	Average	445.671 nm	Average Roughness, Sa	112.162 nm	Second moment	470.362	Root Mean Square, Sq	137.972 nm	Surface skewness, Ssk	-1.23697	Coefficient of kurtosis, Sku	0.378966	Entropy	5.8896	Redundance	-8.12413
Amount of sampling	2601																											
Max	564.278 nm																											
Min	0 nm																											
Peak-to-peak, Sy	564.278 nm																											
Ten point height, Sz	286.076 nm																											
Average	445.671 nm																											
Average Roughness, Sa	112.162 nm																											
Second moment	470.362																											
Root Mean Square, Sq	137.972 nm																											
Surface skewness, Ssk	-1.23697																											
Coefficient of kurtosis, Sku	0.378966																											
Entropy	5.8896																											
Redundance	-8.12413																											
Ti ₁₀₀ nm																												
		<table><tr><td>Amount of sampling</td><td>2601</td></tr><tr><td>Max</td><td>324.788 nm</td></tr><tr><td>Min</td><td>0 nm</td></tr><tr><td>Peak-to-peak, Sy</td><td>324.788 nm</td></tr><tr><td>Ten point height, Sz</td><td>156.161 nm</td></tr><tr><td>Average</td><td>85.0557 nm</td></tr><tr><td>Average Roughness, Sa</td><td>44.2522 nm</td></tr><tr><td>Second moment</td><td>101.443</td></tr><tr><td>Root Mean Square, Sq</td><td>55.2637 nm</td></tr><tr><td>Surface skewness, Ssk</td><td>0.944835</td></tr><tr><td>Coefficient of kurtosis, Sku</td><td>0.695638</td></tr><tr><td>Entropy</td><td>5.88169</td></tr><tr><td>Redundance</td><td>-13.4954</td></tr></table>	Amount of sampling	2601	Max	324.788 nm	Min	0 nm	Peak-to-peak, Sy	324.788 nm	Ten point height, Sz	156.161 nm	Average	85.0557 nm	Average Roughness, Sa	44.2522 nm	Second moment	101.443	Root Mean Square, Sq	55.2637 nm	Surface skewness, Ssk	0.944835	Coefficient of kurtosis, Sku	0.695638	Entropy	5.88169	Redundance	-13.4954
Amount of sampling	2601																											
Max	324.788 nm																											
Min	0 nm																											
Peak-to-peak, Sy	324.788 nm																											
Ten point height, Sz	156.161 nm																											
Average	85.0557 nm																											
Average Roughness, Sa	44.2522 nm																											
Second moment	101.443																											
Root Mean Square, Sq	55.2637 nm																											
Surface skewness, Ssk	0.944835																											
Coefficient of kurtosis, Sku	0.695638																											
Entropy	5.88169																											
Redundance	-13.4954																											
Ti _{Al50_50} nm																												
		<table><tr><td>Amount of sampling</td><td>2704</td></tr><tr><td>Max</td><td>492.317 nm</td></tr><tr><td>Min</td><td>0 nm</td></tr><tr><td>Peak-to-peak, Sy</td><td>492.317 nm</td></tr><tr><td>Ten point height, Sz</td><td>246.491 nm</td></tr><tr><td>Average</td><td>100.471 nm</td></tr><tr><td>Average Roughness, Sa</td><td>53.3211 nm</td></tr><tr><td>Second moment</td><td>128.419</td></tr><tr><td>Root Mean Square, Sq</td><td>79.9811 nm</td></tr><tr><td>Surface skewness, Ssk</td><td>2.38182</td></tr><tr><td>Coefficient of kurtosis, Sku</td><td>6.79082</td></tr><tr><td>Entropy</td><td>5.99307</td></tr><tr><td>Redundance</td><td>-9.37664</td></tr></table>	Amount of sampling	2704	Max	492.317 nm	Min	0 nm	Peak-to-peak, Sy	492.317 nm	Ten point height, Sz	246.491 nm	Average	100.471 nm	Average Roughness, Sa	53.3211 nm	Second moment	128.419	Root Mean Square, Sq	79.9811 nm	Surface skewness, Ssk	2.38182	Coefficient of kurtosis, Sku	6.79082	Entropy	5.99307	Redundance	-9.37664
Amount of sampling	2704																											
Max	492.317 nm																											
Min	0 nm																											
Peak-to-peak, Sy	492.317 nm																											
Ten point height, Sz	246.491 nm																											
Average	100.471 nm																											
Average Roughness, Sa	53.3211 nm																											
Second moment	128.419																											
Root Mean Square, Sq	79.9811 nm																											
Surface skewness, Ssk	2.38182																											
Coefficient of kurtosis, Sku	6.79082																											
Entropy	5.99307																											
Redundance	-9.37664																											

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

În concluzie : în urma măsurătorilor realizate cu Microscopul de forță atomică NTEGRA s-a observat că există niște valori medii, minime și maxime, ale parametrilor obținuți pentru filmele subțiri depuse în funcție de substrat, prezentate în tabelul urmator.

Tabel 3. Valori determinate minime, maxime si medii ale rugozitatii filmelor subtiri depuse pe substraturile din diferite tipuri de otel.

Substrat	Film depus	S _a (nm) minim	S _a (nm) maxim	S _a mediu (nm)
1	2	3	4	5
OLC45	Al_50 nm	52.6451	105.8387	79.2419
	Cr_50 nm	58.9096	104.3708	81.6402
	Ti_100 nm	65.5779	87.8316	76.7047
	Ti_Al_50_50 nm	63.4798	146.6480	105.0639
Rul1	Al_50 nm	75.2556	101.7819	88.5187
	Cr_50 nm	67.7934	109.4168	88.6051
	Ti_100 nm	71.0554	121.4394	96.2474
	Ti_Al_50_50 nm	45.8398	110.2120	78.0259
C120	Al_50 nm	56.3595	106.7635	81.5615
	Cr_50 nm	63.7867	119.1905	91.4886
	Ti_100 nm	54.0777	98.2362	76.1569
	Ti_Al_50_50 nm	76.5809	72.9521	74.7665
OSC	Al_50 nm	52.4575	81.8669	67.1622
	Cr_50 nm	51.4096	107.6374	79.5235
	Ti_100 nm	28.1934	71.8515	50.0224
	Ti_Al_50_50 nm	53.3211	166.7670	110.0440

În concluzie: în urma analizei valorilor medii ale rugozității straturilor depuse se observa că stratul cu cea mai bună uniformitate la suprafață se găsesc pe proba de oțel OSC, suprafață ce mai uniformă ne este dată de substratul de Titan, dintre toate filmele subțiri depuse cu o grosime de 50nm aluminiul prezintă o formă uniformă pe acest tip de oțel.

Valorile obtinute in urma calculului indicelui de asimetrie ale filmelor subtiri depuse pe substraturile din diferite tipuri de otel sunt prezentate in tabelul 4.

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

Tabel 4. Valori minime, maxime și medii ale indicelui de asimetrie ale filmelor subțiri
depuse pe substraturile din diferite tipuri de oțel.

Substrat	Film depus	S_{sk} maxim	S_{sk} minim	S_{sk} mediu
1	2	3	4	5
OLC45	Al_50 nm	1.0543	-1.1978	-0.0717
	Cr_50 nm	0.9804	-0.9406	0.0199
	Ti_100 nm	1.3628	-1.5943	-0.1157
	Ti_Al_50_50 nm	0.5641	-0.9308	-0.1833
Rul1	Al_50 nm	0.7067	-1.2334	-0.2633
	Cr_50 nm	1.3159	-1.2578	0.0290
	Ti_100 nm	1.2781	-1.1218	0.0781
	Ti_Al_50_50 nm	0.4337	-1.8218	-1.3881
C120	Al_50 nm	1.0363	-1.1348	-0.0492
	Cr_50 nm	1.4193	-1.2899	0.0647
	Ti_100 nm	2.2409	-1.2562	0.4923
	Ti_Al_50_50 nm	0.3165	-1.6869	-0.6851
OSC	Al_50 nm	1.4189	-1.1291	0.1449
	Cr_50 nm	1.2573	-1.3932	-0.0679
	Ti_100 nm	1.5740	-1.2738	0.1502
	Ti_Al_50_50 nm	2.3818	0.04161	1.2117

În concluzie: pe substratul din oțel de tip OLC45 s-au obținut straturi subțiri cu grade de asimetrie diferite în funcție de materialul depus. Pe substratul de oțel tip Rul1 stratul de aluminiu depus are un indice de asimetrie S_{sk} mediu negativ (conform tabelului 16) ceea ce demonstrează o repartitie de sondaj asimetrică spre stânga. Tot pe același tip de oțel și valorile indicelui de asimetrie a celorlalte două straturi subțiri depuse (Cr și Ti) au avut valori medii foarte apropiate de zero, putându-se considera că este vorba despre o distribuție simetrică.

Stratul de aluminiu depus pe C120 are un indice de asimetrie S_{sk} mediu negativ (conform tabelului 16), dar foarte aproape de zero. Astfel, poate fi considerată o distribuție simetrică a stratului de aluminiu. Tot pe același tip de oțel, valorile indicelui de asimetrie a celorlalte două straturi subțiri depuse (Cr și Ti) au avut valori medii pozitive, dar puțin diferite.

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

Și pe substratul de oțel de tip OSC s-au obținut valori variate ale indicelui de asimetrie, în funcție de material și de grosimea stratului depus. Straturile de Al și Ti au valori pozitive ale indicelui de asimetrie, astfel că avem de a face cu depuneri ale căror repartiții de sondaj sunt asimetrice spre dreapta. Stratul de Cr are o valoare negativă a acestui indice, având o repartiție de sondaj asimetrică spre stânga. Ca și în cazul primului tip de substrat prezentat, valorile indicelui de asimetrie sunt foarte apropiate de zero pentru toate cele trei straturi depuse, astfel încât se poate considera ca acestea au o distribuție simetrică. Valorile obținute în urma calculului **coeficientului de aplatizare** ale filmelor subțiri depuse pe substraturile din diferite tipuri de oțel sunt prezentate în tabelul 5.

Tabel 5. Valori minime, maxime și medii ale coeficientului de aplatizare ale filmelor subțiri depuse pe substraturile din diferite tipuri de oțel.

Substrat	Film depus	$S_{ka\text{minim}}$	$S_{ka\text{maxim}}$	$S_{ka\text{mediu}}$	Exces
OLC45	Al_50 nm	0.8471	1.2589	1.0530	-1.9470
	Cr_50 nm	3.2135	-0.0060	1.0637	-1.9363
	Ti_100 nm	2.6318	2.2308	2.4313	-0.5687
	Ti_Al_50_50 nm	0.5400	-0.8028	-0.1313	-3.1313
Ru11	Al_50 nm	-0.2056	1.4852	0.6398	-2.3602
	Cr_50 nm	1.4417	0.3965	0.9191	-2.0809
	Ti_100 nm	1.3086	0.0123	0.6604	-2.3395
	Ti_Al_50_50 nm	-0.8393	1.7311	0.4459	-2.5540
C120	Al_50 nm	1.0823	0.6564	0.8693	-2.1306
	Cr_50 nm	2.7093	0.6000	1.6546	-1.3453
	Ti_100 nm	7.2200	1.1633	4.1916	1.1916
	Ti_Al_50_50 nm	-0.4691	2.5456	1.0382	-1.9617
OSC	Al_50 nm	2.8380	1.1115	1.9747	-1.0252
	Cr_50 nm	1.8958	1.2973	1.5965	-1.4034
	Ti_100 nm	3.8322	1.0229	2.4275	-0.5724
	Ti_Al_50_50 nm	6.7908	-1.5501	2.6203	-0.3796

În concluzie: În urma analizei valorilor obținute în experimentele realizate s-a observat ca valorile excesului calculat sunt atât pozitive cât și negativ, ceea ce indică o repartiție leptocurbică cât și platicurbică. Ținând cont de definiția și importanța

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

coeficientului de aplatizare, pentru probele studiate în aceste experimente s-au obținut rezultate ce indică următoarele concluzii:

- Valorile obținute în urma analizei coeficientului de aplatizare ne arată o repartiție platicurtică a tuturor filmelor subțiri depuse pe toate cele 4 tipuri de substrat;
- Excepția este în cazul filmului de Ti de 100 nm grosime, a cărui exces are o valoare pozitivă, prin urmare o repartiție leptocurtică.

4.4. Determinarea duritatii straturilor subtiri depuse

Sistemul HMV-2, duritatea straturilor subtiri depuse a fost analizatautilizand sistemul pentru măsurarea micro-durității HMV-2 din dotarea **Laboratorului Incercari Metalografice** din cadrul **Univeristatii Politehnica Bucuresti**.

Figura 5. Sistemul automat de citire pentru testele de duritate Vickers.



În urma măsurătorilor durității realizate la o temperatură de 24°C, umiditate de 50%, cu o forță $F = 98.07\text{mN}$, $HV_{0.01}$ în 10 secunde s-au obținut rezultatele prezentate în tabelul 6.

**Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice
ale componentelor mecatronice**

*Tabel 6. Rezultate obtinute in urma masurarii duritatii straturilor nanostructurate depuse pe
tipuri diferite de otel.*

Strat	Substrat	Puncte masurate	SD (Deviatie standard)	CV (Coeficient de variatie)	M (Valoarea medie a duritatii)
1	2	3	4	5	6
Ti	OLC45	92,4; 90,2; 90,8; 88,0; 96,2	3,05	3,34	91,5
	Rul1	79,5; 79,8; 80,5; 79,6; 75,7	1,90	2,40	79,0
	C120	85,5; 86,8; 86,7; 82,3; 93,3	4,00	4,61	86,9
	OSC8	89,9; 94,4; 87,1; 95,6; 88,0	3,81	4,19	91,0
Cr	OLC45	94,0; 101; 89,5; 93,8; 95,6	4,15	4,38	94,8
	Rul1	97,7; 94,3; 92,7; 95,9; 91,1	2,59	2,75	94,3
	C120	88,4; 91,3; 91,4; 98,9; 102	5,76	6,10	94,4
	OSC8	93,4; 92,9; 97,7; 100; 99	3,21	3,32	96,6
Al	OLC45	81,3; 81,9; 82,3; 80,1; 81,5	0,83	1,02	81,4
	Rul1	83,9; 87,1; 84,6; 86,0; 83,0	1,64	1,93	84,9
	C120	83,4; 86,3; 86,6; 84,7; 82,8	1,69	2,00	84,8
	OSC8	82,9; 83,3; 88,6; 85,6; 81,6	2,76	3,27	84,4
Ti+Al	OLC45	87,4; 84,4; 85,9; 82,2; 79,8	3,01	3,58	83,9
	Rul1	77,6; 84,4; 81,1; 80,8; 82,8	2,54	3,12	81,3
	C120	80,8; 82,9; 86,4; 87,6; 83,7	2,73	3,24	84,3
	OSC8	91,0; 81,6; 82,9; 86,7; 89,3	4,03	4,67	86,3

În urma analizei valorilor medii ale durității tuturor straturilor depuse pe diferitele tipuri de substraturi, principala concluzie: valoarea medie cea mai ridicată a durității pentru toate cele patru tipuri de straturi nanometrice o intalnim pe suprafata substratului OSC8. Acest lucru ar putea să indice și o bună aderența a straturilor depuse pe acest tip de substrat

4.5. Determinarea aderenței straturilor subțiri depuse

Sistemul CETR-UMT 2

Un sistem CETR-UMT, din dotarea **Laboratorului Încercări Metalografice** din cadrul **Universității Politehnica București** a fost utilizat pentru a realiza măsurători și teste în scopul determinării aderenței straturilor subțiri.

Figura 6. Sistem CETR-UMT 2.



Aderența straturilor metalice depuse pe diferite substraturi de oțel a fost determinată prin teste de zgariere utilizând sistemul **CETR-UMT 2**, după un ciclu de măsură în 3 pași, cu o forță normală de 5 N, pe o lungime de 5 mm, cu o viteză de 0.2 mm/s, având o durată de 25s.

Au fost utilizate și determinate forța tangentială F_x ; forța normală F_z ; deplasarea pe direcția normală Z; deplasarea pe direcția tangentială Y; timpul T; forța de frecare (valoarea în modul a lui F_x) F_f ; coeficientul de frecare (raportul F_x/F_z în modul) COF.

Tabel 7. Valorile medii obținute în urma testărilor și măsurătorilor de aderență

Strat	Substrat	Timp [s]	Adâncime [mm]	Forța F_f [N]	COF
1	2	3	4	5	6
Ti 100nm	OLC45	1,9312	0,01	3,915	0,81
	Rul1	1,9609	0,0105	3,139	0,639

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

1	2	3	4	5	6
	C120	2,0527	0,012	4,16	0,846
	OSC8	1,656	0,0105	4,482	0,91
Cr 50nm	OLC45	2,6121	0,0185	4,876	0,991
	Rul1	1,606	0,01	3,891	0,802
	C120	2,012	0,013	3,557	0,719
	OSC8	2,3779	0,021	3,461	0,717
Al 50nm	OLC45	3,729	0,0165	3,497	0,727
	Rul1	3,9331	0,01	3,229	0,664
	C120	2,5	0,009	2,972	0,605
	OSC8	4,4307	0,02	6,272	1,267
Ti 50nm + Al 50nm	OLC45	2,053	0,013	3,658	0,739
	Rul1	2,012	0,0125	3,199	0,647
	C120	1,8591	0,01	3,503	0,702
	OSC8	2,0829	0,017	3,354	0,701

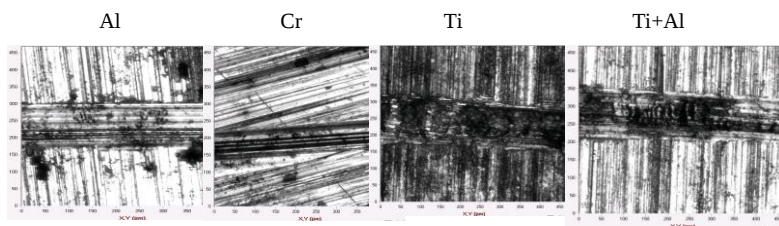
Se observă că dintre toate filmele subțiri depuse, cromul este cel care prezintă cea mai mare aderență pentru două tipuri de substraturi. Titanul are și el o aderență ridicată la substratul de tip C120.

În ceea ce privește momentul desprinderii Al se desprinde cel mai rapid de proba de substratul de tip C120, Cr de pe Rul1, Ti de pe substratul de tip OSC8, iar multistratul Ti+Al se desprinde cel mai repede de pe substratul C120.

Dacă se iau în considerare, în principal, valorile timpilor de desprindere pe cele 4 tipuri de substraturi se observa că Al prezintă cel mai târziu moment de desprindere pe toate cele 4 oțeluri, ceea ce poate indica o bună aderență între acesta și variantele de oțel.

Pentru caracterizarea topografică a straturilor subțiri depuse și supuse testelor de zgariere a fost folosit și sistemul de măsurare cu laser a microgeometriei suprafețelor - KLA TENCOR MICRO XAM 100 fiind obținute rezultate similare. În figura 7 sunt prezentate câteva imagini obținute în urma unor astfel de analize folosind un cap de măsurare 50x.

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice



Se pot observa aceleasi suprafete cu o uniformitate destul de scazuta, la nivel micro, dar cu o valoare a rugozitatii de nivel nm.

În urma caracterizării topografice complete a suprafețelor straturilor subțiri depuse si supuse testelor de zgariere au fost determinati diferiti parametrii topografici: rugozitatea R_a , asimetria suprafeței R_{sk} , coeficientul de aplatizare R_{ka} , înălțimea maxima h_{max} , înălțimea in 10 puncte R_z , aceștia oferind informații despre suprafața scanata. Pentru interpretarea datelor obtinute au fost utilizate valorile medii ale parametrilor topografici. Valorile fiecarui parametru topografic important determinat a fost analizat, in primul rand printr-o variatie a fiecaruia in functie de materialul depus si de tipul de substrat.

Tabel 8. Parametrii topografici ai suprafețelor filmelor subțiri supuse testelor de zgâriere determinați utilizând microscopul de forțăatomică NTEGRA NT-MDT și softul microscopului – NOVA SPM Software.

Substrat	Material depus	R_a medie (nm)	R_{sk} mediu	R_{ka} mediu	h_{max} medie	R_z medie
1	2	3	4	5	6	7
OLC 45	Al	112.02	0.465	0.707	568.2	377.5
	Cr	113	1.137	1.250	568	284
	Ti	58	0.899	1.430	367.1	180.3
	Ti+Al	95.37	1.551	2.358	646.6	319
Ru11	Al	81.18	0.861	0.668	488.3	240.2
	Cr	62	0.864	0.982	430	238

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

1	2	3	4	5	6	7
	Ti	54	1.162	1.469	397.4	196.7
	Ti+Al	102.39	1.176	0.895	603.5	299.4
C120	Al	124.5	0.955	1.077	660.9	331.5
	Cr	47	1.756	5.795	442	218
	Ti	115	0.343	0.647	653.7	326.6
	Ti+Al	117.74	1.273	1.064	658	327.2
OSC8	Al	167.6	0.410	1.154	696.5	377.5
	Cr	43	1.450	3.998	353	172
	Ti	62	0.415	0.325	317.7	198.8
	Ti+Al	123.79	0.905	0.066	624.4	310.5

Pe substratul de oțel tip OLC45, valoare a rugozității stratului de Ti depus indică faptul că este cel mai puțin deteriorat strat pe acest tip de substrat. Luând în calcul și valorile rugozității acestui strat pe celelalte substraturi, rezultă că Ti a fost puțin deteriorat după testul de zgâriere atunci când a fost depus și pe OSC8, respectiv C120. Acest lucru indică rezistență mărită aceste valori pot fi influențate și de grosimea stratului depus.

Între Al și Cr, straturi cu aceeași grosime, valoarea rugozității indică o deteriorare mai mare a Cr pe substratul de tip Ru11 și OLC45. Pe substraturile din oțel OSC8 și C120, Al este mai deteriorat, Cr având o suprafață mai rezistentă. Multistratul Ti+Al are o valoare a rugozității dependentă de faptul că stratul superior este cel de, Ti iar Al are o aderență mai bună la cele patru tipuri de substraturi testate.

Încercările experimentale și analizele efectuate au condus la formularea următoarelor concluzii:

- **am făcut încercări experimentale de depunere straturi nanometrice, filme subțiri de Al, Cr, Ti și multistrat Ti+Al prin metoda de evaporare cu fascicul de electroni.** Au fost obținute straturi de Al și Cr cu grosimea de 50 nm, strat de Ti cu grosimea de 100 nm și multistrat Ti+Al cu grosimea de 100 nm depuse pe substraturi de tip OLC54, Ru11, C120, OSC8;
- **în cadrul cercetărilor au fost realizate teste și măsurători** pentru caracterizarea fizico-mecanică și topografică a filmelor subțiri depuse;

- **au fost analizate rezultatele obținute în urma caracterizării** structurilor nanometrice depuse: caracterizări structurale și caracterizări ale topografiei superficiale rezultate prin acoperire, caracterizări fizico-mecanice (determinarea durității și aderenței straturilor);
- **în urma analizei valorilor unor parametri tribologici**, precum rugozitate, asimetria suprafeței și coeficient de aplatizare s-a ajuns la concluzia că pe substratul de oțel de tip OSC8 sunt depuse straturile cu cea mai uniformă suprafață. S-a observat ca pe toate tipurile de oțel folosite ca substrat, Ti are valoarea cea mai mică a rugozității, urmat de Al și apoi de Cr;
- **valoarea pozitivă a indicelui de asimetrie** pentru toate straturile depuse indică o repartitie de sondaj asimetrică spre dreapta;
- **coeficientul de aplatizare** prezintă pentru toate straturile depuse valori care conduc către un exces negativ, ceea ce indică o repartitie platicurtica (curba este aplatizata);
- **s-a observat** ca pe toate cele 4 tipuri de substrat, **Cr este filmul subțire depus care prezintă cea mai mare duritate**. Ti are și el o duritate ridicată, dar în momentul în care acesta este combinat cu Al, duritatea sa scade, având în vedere că stratul superior este cel de Al, un metal cu o duritate mai scăzută. Pe suprafața substratului OSC8 s-a obținut valoarea medie cea mai ridicată a durității pentru toate cele patru tipuri de straturi nanometrice;
- **în urma studierii aderenței straturilor depuse s-a ajuns la concluzia** că Al se desprinde cel mai rapid de pe substratul de tip C120, Cr de pe Ru1, Ti de pe substratul de tip OSC8, iar multistratul Ti+Al se desprinde cel mai repede de pe substratul C120. Luând în considerare efectiv valorile timpilor de desprindere pe cele 4 tipuri de substraturi s-a observat că Al prezintă cel mai târziu moment de desprindere pe toate cele 4 oțeluri, ceea ce poate indică o bună aderență între acesta și variantele de oțel;

- **valorile medii ale indicelui de asimetrie**, al celor trei tipuri de straturi depuse pe cele patru tipuri de substraturi **au avut valori foarte apropiate de zero**, majoritatea sub 0,1 s-a ajuns la concluzia că acestea au o distribuție simetrică. Singura excepție a fost în cazul stratului de Ti care la o grosime de 100 nm depus pe substratul de oțel de tip C120, care are o repartitie asimetrică spre dreapta;
- **analiza valorilor coeficientului de aplatizare a probelor studiate** indică o repartitie platicurtică (curba este aplatizată) a tuturor filmelor subțiri depuse pe toate cele patru tipuri de substrat; cu excepția filmului de Ti de 100 nm grosime, care are o repartitie leptocurtică (înălțimea curbei este mai mare comparativ cu cea normală);
- **ținând cont de faptul că valorile medii ale rugozității** sunt de ordinul nm s-a considerat că **nu a existat o distrugere foarte mare a straturilor depuse**. Stratul de Ti depus pe toate cele patru tipuri de oțel prezintă cea mai mică valoare a rugozității dintre toate straturile depuse. Faptul că testele de zgâriere nu au distrus suprafață foarte tare a fost interpretat ca o bună aderență a stratului de Ti pe tipurile de substraturi de oțel utilizate în experimente;

Succesiunea de cercetări experimentale realizate în cadrul acestei teze de doctorat, pornind de la depunerea de filme subțiri metalice pe diferite substraturi de oțel, până la caracterizarea lor fizico-mecanica a **urmărit evoluția unei structuri nanocompozite de acoperire, care poate fi aplicată într-un sistem mecatronic.**

CAPITOLUL V. MATERIALE ȘI ECHIPAMENTE FOLOSITE PENTRU TESTAREA FILMELOR SUBȚIRI ÎN SISTEME MECATRONICE REALE

În urma testelor efectuate pe probele de laborator, filmele subțiri de Ti (100 nm) și Cr (50 nm) care au fost considerate ca având proprietăți superioare, au fost depuse pe un sistem mecatronic real realizat din Rul1. Comportamentul straturilor de Ti și Cr depuse pe componente mecatronice (dispozitiv de ghidare-precentrare) a fost analizat comparativ cu scopul de a obține informații legate de rezistența la uzură a acestor straturi în mediu real.

Testările (respectiv încercările funcționale) au fost realizate în condiții dinamice și de timp real, având ca scop evaluarea comportamentului tribologic al componentelor aparținând unui dispozitiv de ghidare-precentrare, luat ca exemplu în cercetarea privind uzura suprafețelor cu depuneri de Cr și Ti, în comparație cu suprafețele fără depuneri.

Schema dispozitivului de ghidare-precentrare este prezentată în figură 8. Componentele acestui dispozitiv se pot observa în figură 9.

Figura 8. Schema dispozitivului de ghidare-precentrare

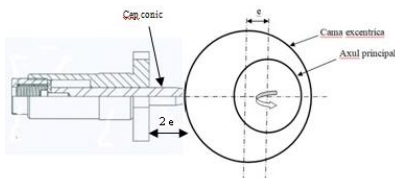


Figura 9. Componentele dispozitivului de ghidare testate.



Programul de testare a cuprins determinări ale uzurii la piesele tip cep conic neacoperite și acoperite (diametru mare 14 cm, diametru mic 10 cm), măsurări ale durtății suprafețelor și determinarea diametrelor înainte și după testele de uzare.

5.1. Caracterizarea topografică a componentelor mecatronice reale

Caracterizarea topografică a suprafețelor componentelor mecatronice reale neacoperite și a straturilor subțiri depuse pe suprafața lor și supuse testelor de uzură în mediu real a fost realizată utilizând microscopul de forță atomică NTEGRA NT-MDT, din dotarea „Laboratorului MEMS & NEMS Mecatronice Nanometrice din cadrul Institutului Național de Cercetare Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării - INCDMTM.”

Pentru o caracterizare topografică completă a suprafețelor au fost realizate scanări ale unor suprafețe de $50 \times 50 \mu\text{m}$ cu microscopul de forță atomică și au fost determinați diferiți parametri topografici cu ajutorul NOVA SPM Software – softul microscopului.

Parametrii topografici determinați sunt rugozitatea R_a , asimetria suprafeței R_{sk} , coeficientul de aplatizare R_{ka} , înălțimea maximă h_{max} , înălțimea în 10 puncte R_z (definiți în capitolul 4.3), aceștia oferind informații despre suprafața scanată.

5.1.1. Caracterizarea topografică a componentelor mecatronice testate

Componentele mecatronice studiate au fost caracterizate la scală microscopică utilizând camera video a microscopului de forță atomică NTEGRA. Câteva imagini obținute sunt prezentate în continuare (Figura 10 și Figura 11). Din toate aceste analize s-a observat că există o uniformitate a suprafețelor, însă, la nivel microscopic, toate par a avea o suprafață nu foarte plană.

Figura 10. Suprafata componentei mecatronice cu diametru mare (14 cm).

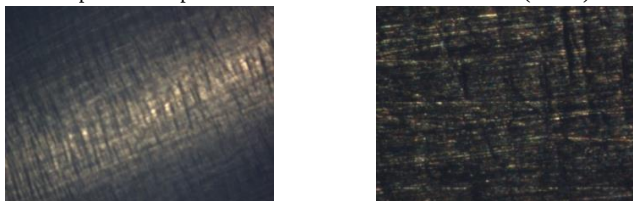
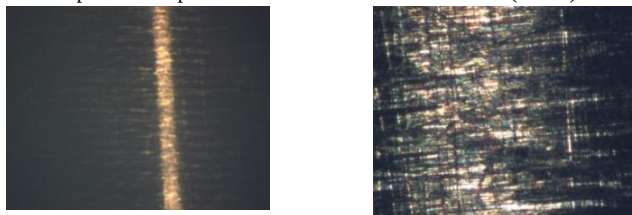
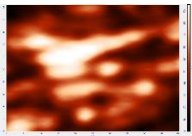
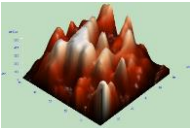
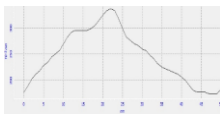
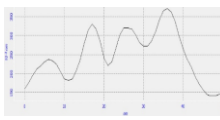


Figura 11. Suprafata componentei mecatronice cu diametru mic (10 cm).

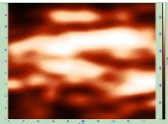
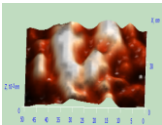
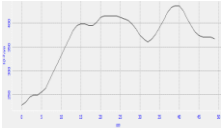
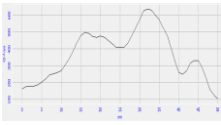


Înainte de depunerii straturilor subțiri de Ti și Cr pe substraturi din oțel de tip Rul1, componenta mecatronică a fost analizată din punct de vedere topografic utilizând microscopia de forță atomică. Au fost realizate scanări de $50 \times 50 \mu\text{m}$ pentru a fi determinați parametrii topografici menționați anterior.

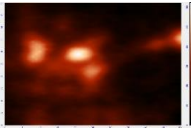
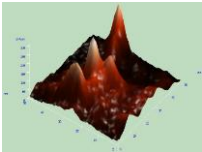
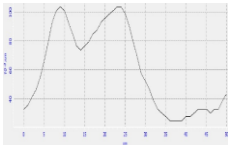
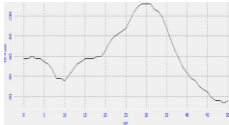
Tabel 9. Parametrii topografici ai componentei mecatronice cu diametru mare înainte de testare.

2D/ 3D	Parametrii topografici	Profil pe axa x/y
1	2	3
 	Amount of sampling 2652 Max 0.525521 nm Min 0 nm Peak-to-peak, Sp 0.525521 nm Ten point height, Sz 0.285003 nm Average 0.24521 nm Average Roughness, Sa 0.103544 nm Root Mean Square, Sq 0.126109 nm Second moment 0.0760313 Surface skewness, Ssk 0.515818 Coefficient of kurtosis, Ska -0.556308 Entropy 7.10758 Redundance -10.6651	 

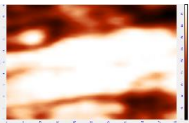
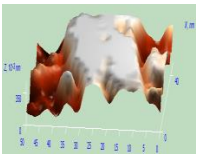
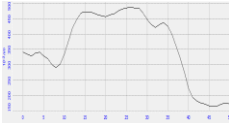
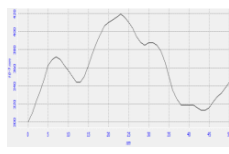
Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

1	2	3
Parametrii topografici ai componentei mecatronice cu diametru mare dupa testare		
 	Amount of sampling2550 Max0.681392 nm Min0 nm Peak-to-peak, Sy0.681392 nm Ten point height, Sz0.342443 nm Average0.36684 nm Average Roughness, Sa0.16356 nm Root Mean Square, Sq0.189447 nm Second moment0.170462 Surface skewness, Ssk0.124034 Coefficient of kurtosis, Sku-1.15943 Entropy7.42999 Redundance-8.9112	 

Tabel 10. Parametrii topografici ai componentei mecatronice cu diametru mic înainte de testare

2D/ 3D	Parametrii topografici	Profil pe axa x/y
1	2	3
 	Amount of sampling2601 Max0.311376 nm Min0 nm Peak-to-peak, Sy0.311376 nm Ten point height, Sz0.147494 nm Average0.0604796 nm Average Roughness, Sa0.037283 nm Root Mean Square, Sq0.0601872 nm Second moment0.00617654 Surface skewness, Ssk1.52377 Coefficient of kurtosis, Sku2.74746 Entropy5.78551 Redundance-13.7936	 

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

1	2	3
Parametrii topografici ai componentei mecatronice cu diametru mic după testare		
2D/ 3D	Parametrii topografici	Profil pe axa x/y
 	Amount of sampling 2601 Max 0.64126 nm Min 0.153277 nm Peak-to-peak, S_y 0.487984 nm Ten point height, S_z 0.400397 nm Average 0.512005 nm Average Roughness, S_a 0.12327 nm Root Mean Square, S_q 0.138838 nm Second moment 0.261425 Surface skewness, S_{sk} -0.6748 Coefficient of kurtosis, S_{ka} -0.962076 Entropy 5.83318 Redundance -9.17371	 

Tabel 11. Valori medii ale parametrilor topografici obținuți în urma caracterizării suprafețelor componentelor mecatronice din oțel de tip Rul1, cu diametru mare și cu diametru mic, înainte de testare.

Suprafata	Rugozitate R_a	Indicele de asimetrie R_{sk}	Coefficient de aplatizare R_{ka}
Componenta mecatronică Rul1 cu diametru mare	0.09803766	0.963071733	1.1939654
Componenta mecatronică Rul1 cu diametru mic	0.06636966	1.1821864	1.328807467

În urma analizei suprafeței stratului de oțel de tip Rul1 a celor două piese (cu diametru mare și cu diametru mic) utilizate în experimentări s-a observat ca rugozitatea a avut valori medii până în 100 nm. Acestea indică o suprafață netedă, cu câteva abateri de la forma ideală prezente posibil în urma efectuării procesării dinaintea testării la uzură. Valorile acestui parametru nu pot demonstra o suprafață aspră.

Indicele de asimetrie R_{sk} evaluează gradul de asimetrie a suprafeței celor două piese. Atât pentru piesă cu diametru mare, cât și pentru cea cu diametru mic, valorile acestui parametru sunt pozitive, ceea ce indică o repartitie de sondaj asimetrică spre dreapta. Ținând cont și de coeficientul de aplatizare R_{ka} a fost apreciată mai complex forma distribuției suprafeței de oțel de tip Rul1 de pe cele două piese. Acesta ține cont de exces E

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

– diferența dintre coeficientul de aplatizare și trei. Conform valorilor coeficientului de aplatizare obținute, cele două piese au excesul negativ, ceea ce indică o repartiție platicurtica (o curbă aplatizată a histogramei care se poate realiza).

Tabel 12. Valori medii ale parametrilor topografici obținuți în urma caracterizării suprafețelor componentelor mecatronice din oțel de tip Ru11, cu diametru mare și cu diametru mic, după testare.

Suprafata	Rugozitate R_a	Indicele de asimetrie R_{sk}	Coeficient de aplatizare R_{ka}
Componenta mecatronică Ru11 cu diametru mare	0.146217207	0.7138672	-0.318472407
Componenta mecatronică Ru11 cu diametru mic	0.077953533	-1.5588624	2.712825933

În urma testelor de uzare, valorile rugozității au crescut în cazul suprafețelor ambelor piese. Variația acestui parametru este mai mare în cazul piesei cu diametru mare, care poate demonstra existența unei suprafețe dure, distruse în urma testelor de uzură. Variația de doar 11 nm care apare pentru piesă cu diametru mai mic, indică faptul că aceasta a avut o rezistență mai mare la testele de zgâriere față de piesă cu duritate mare.

Indicele de asimetrie scade în urma testelor de uzură în cazul ambelor piese. Componenta mecatronică cu diametru mare are un indice R_{sk} pozitiv, ceea ce indică o repartiție de sondaj asimetrică spre dreapta. Coeficientul de aplatizare R_{ka} scade în cazul acestei piese, ducând la un efort negativ mai mare decât înainte de testele de uzură, ceea ce demonstrează existența unei repartiții platicurtice (o curbă aplatizată a histogramei care se poate realiza).

Pentru componenta mecatronică cu diametru mic, indicele de asimetrie R_{sk} scade, devenind negativ și demonstrează în acest fel existența unei repartiții de sondaj asimetrică spre stânga. Acest lucru indică și distrugerea suprafeței, având ca urmare schimbarea asimetriei suprafeței, în urma testelor de uzură.

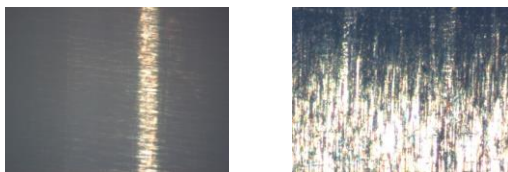
Coeficientul de aplatizare R_{ka} crește în cazul componente mecatronice cu diametru mic, însă valoarea sa arată existența unui exces negativ, care nu duce la schimbarea tipului de repartiție existentă anterior. Este vorba despre o repartiție platicurtica (adică o curbă aplatizată a histogramei care se poate realiza), care poate indica o deteriorare mai scăzută a suprafeței în urma proceselor de testare.

5.1.2. Caracterizarea topografică a straturilor subțiri depuse pe componentele mecatronice reale

În urma depunerii prin evaporare cu fascicul de electroni au fost obținute straturi subțiri de Ti și Cr pe substraturi din oțel de tip Rul1. Aceste straturi au avut grosimi de 50 nm (Cr) și 100 nm (Ti).

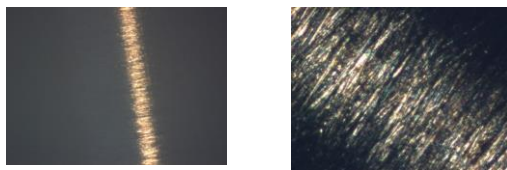
Filmele subțiri depuse au fost caracterizate la scala microscopică utilizând camera video a microscopului de forță atomică NTEGRA. Câteva imagini obținute sunt prezentate în Figură 12 și Figură 13.

Figura 12. Suprafața stratului de Ti depus pe componenta mecatronică cu
diametru mare



Marire maxima

Figura 13. Suprafața stratului de Cr depus pe componenta mecatronică cu diametru mic.

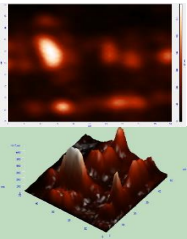
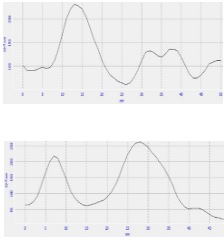
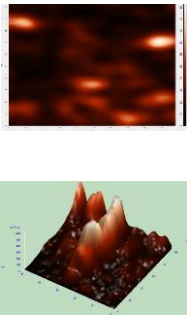
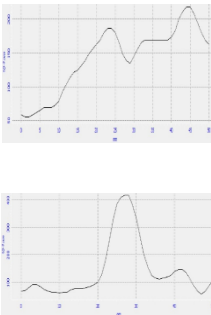


Marire maxima

În urma scanării cu ajutorul microscopului de forță atomică a unor suprafețe de $50 \times 50 \mu\text{m}$ de pe diferitele filme depuse, au putut fi analizați parametrii topografici, care oferă informații legate de distribuția stratului depus și supus testelor de uzură. În acest fel s-a realizat caracterizarea în detaliu a structurii filmelor metalice diferite depuse pe componente mecatronice realizate din oțel de tip Rul1.

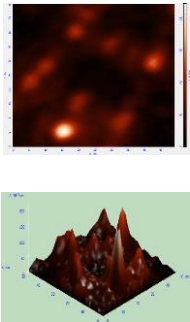
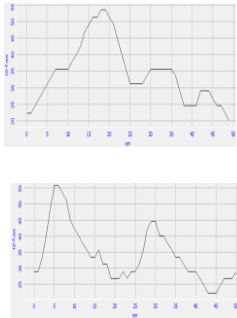
Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

Tabel 13. Parametrii topografici ai suprafeței stratului de Ti depus pe componenta mecatronică cu diametru 14 cm înainte de testare

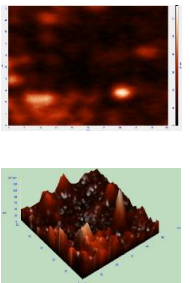
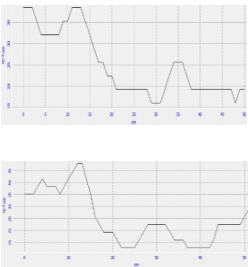
2D/ 3D	Parametrii topografici	Profil pe axa x/y
1	2	3
	Amount of sampling 2601 Max 0.683955 nm Min 0 nm Peak-to-peak, Sy 0.683955 nm Ten point height, Sz 0.339336 nm Average 0.119485 nm Average Roughness, Sa 0.0781562 nm Root Mean Square, Sq 0.10968 nm Second moment 0.0263064 Surface skewness, Ssk 2.13419 Coefficient of kurtosis, Ska 5.83106 Entropy 6.40448 Redundance -7.51826	
Parametrii topografici ai suprafeței stratului de Ti, depus pe componenta mecatronică cu diametru de 14 cm, după testare		
	Amount of sampling 2652 Max 0.641428 nm Min 0 nm Peak-to-peak, Sy 0.641428 nm Ten point height, Sz 0.316231 nm Average 0.142121 nm Average Roughness, Sa 0.098654 nm Root Mean Square, Sq 0.136558 nm Second moment 0.0386015 Surface skewness, Ssk 1.76918 Coefficient of kurtosis, Ska 2.54383 Entropy 6.60075 Redundance -8.23244	

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

Tabel 14. Parametrii topografici ai suprafeței stratului de Cr depus pe componenta mecatronică cu diametru de 10 cm înainte de testare

2D/ 3D	Parametrii topografici	Profil pe axa x/y
1	2	3
	Amount of sampling 2550 Max 0.222782 nm Min 0 nm Peak-to-peak, S_y 0.222782 nm Ten point height, S_z 0.105821 nm Average 0.0341267 nm Average Roughness, S_a 0.0194193 nm Root Mean Square, S_q 0.0265336 nm Second moment 0.00186866 Surface skewness, S_{sk} 2.0509 Coefficient of kurtosis, S_{ka} 7.41095 Entropy 5.20772 Redundance -16.9473	

Parametrii topografici ai suprafeței stratului de Cr, depus pe componenta mecatronică cu diametru de 10 cm, după testare

2D/ 3D	Parametrii topografici	Profil pe axa x/y
	Amount of sampling 2652 Max 0.134585 nm Min 0 nm Peak-to-peak, S_y 0.134585 nm Ten point height, S_z 0.0605631 nm Average 0.0250818 nm Average Roughness, S_a 0.0143045 nm Root Mean Square, S_q 0.0189031 nm Second moment 0.000986423 Surface skewness, S_{sk} 1.62948 Coefficient of kurtosis, S_{ka} 3.0254 Entropy 4.14962 Redundance -21.7795	

Tabel 15. Valori medii ale parametrilor topografici obținuți în urma caracterizării suprafețelor straturilor subțiri depuse

Strat depus	Rugozitate R _a	Indicele de asimetrie R _{sk}	Coefficient de aplatizare R _{ka}
Ti 100 nm	0.08146768	1.334335933	2.207712333
Cr 50 nm	0.034456727	1.755032333	4.3030202

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

În concluzie: valorile rugozității suprafețelor celor două straturi (Ti și Cr) depuse, de ordinul zecilor de nm, pe cele două piese indică existența unor straturi uniforme, bine depuse, stratul de Cr fiind mult mai neted decât cel de Ti.

Indicele de asimetrie R_{sk} al stratului de Ti depus pe suprafața componentei mecatronice cu diametru mare are o valoare pozitivă, ceea ce indică o repartitie de sondaj a suprafeței stratului depus asimetrică spre dreapta. Coeficientul de aplatizare are o valoare pozitivă, însă excesul care rezultă este tot negativ. Acest lucru indică o repartitie platicurtica (adică o curbă aplatizată a histogramei care se poate realiza). Având în vedere că valoarea excesului este egală cu -0.792287667, foarte apropiată de zero, se apropie de o repartitie mezocurtica.

Indicele de asimetrie R_{sk} al stratului de Cr depus pe suprafața componentei mecatronice cu diametru mare are o valoare pozitivă, ceea ce indică o repartitie de sondaj a suprafeței stratului depus asimetrică spre dreapta. Coeficientul de aplatizare R_{ka} are o valoare pozitivă, dar destul de mare, astfel încât excesul este pozitiv. Ținând cont de acest lucru, rezultă că stratul de Cr depus are o repartitie leptocurtică (înălțimea curbei histogramei care se poate obține este mai mare comparativ cu cea normală).

Tabel 16. Valori medii ale parametrilor topografici obținuți în urma caracterizării suprafețelor straturilor subțiri depuse și supuse testelor de uzură

Strat depus	Rugozitate R_a	Indicele de asimetrie R_{sk}	Coeficient aplatizare R_{ka}
Ti 100 nm	0.09712726	1.165551267	1.500688553
Cr 50 nm	0.0421583	1.693178	3.480143333

În urma testelor de uzură, valorile rugozității celor două straturi cresc, însă cu valori foarte mici, ceea ce indică o rezistență crescută a celor două materiale. Diferența între cele două valori (înainte și după testare) este mai mică pentru stratul de Cr, evidențiind o rezistență mai mare a acestui strat față de cel de Ti.

Indicele de asimetrie R_{sk} al suprafeței stratului de Ti după testele de uzură are o valoare pozitivă, dar mai mică decât cea a stratului depus, ceea ce indică o repartitie de sondaj asimetrică spre dreapta. Și coeficientul de aplatizare R_{ka} are o valoare mai mică decât cel dinaintea testelor, dar tot pozitivă. Acest lucru conduce la un exces negativ,

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

indicând o repartiție platicurtica (adică o curbă aplatizată a histogramei care se poate realiza).

Indicele de asimetrie R_{sk} al suprafeței stratului de Cr după testele de uzură are o valoare pozitivă, dar mai mică decât cea a stratului depus, ceea ce indică o repartiție de sondaj asimetrică spre dreapta. Și în cazul acestui strat coeficientul de aplatizare R_{ka} are o valoare mai mică decât cel dinaintea testelor, dar tot pozitivă. Excesul obținut însă este pozitiv. Ținând cont de acest lucru, rezultă că stratul de Cr depus și supus testelor de uzură are o repartiție leptocurtică (înălțimea curbei histogramei care se poate obține este mai mare comparativ cu cea normală). Având în vedere că valoarea excesului este egală cu 0.48014333, foarte apropiată de zero, se apropie de o repartiție mezocurtica.

În urma analizei comparative a parametrilor topografici obținuți, se observă o scădere a rugozității suprafețelor ambelor componente mecatronice testate, atât a celei acoperite cu Ti cât și a celei acoperite cu Cr. În cele două cazuri, diferența rezultată este de:

- 0.049089947 pentru stratul de Ti depus pe componenta mecatronică cu diametru mare
- 0.035795233 pentru stratul de Cr depus pe componenta mecatronică cu diametru mic

Această scădere a rugozității, care înseamnă și o distrugere scăzută a suprafeței, demonstrează o creștere a rezistenței suprafeței componentei mecatronice în urma depunerii pe suprafața sa a celor două tipuri de straturi metalice.

În urma depunerii straturilor și a analizei rugozității suprafeței celor două componente neacoperite cu rugozitatea stratului în urma testelor de uzură s-a observat pentru ambele materiale o scădere a rugozității suprafeței componentei testate. Aceasta demonstrează încă o dată faptul că straturile subțiri de Ti și Cr îmbunătățesc rezistența la uzura a componentelor mecatronice realizate din oțel de tip Rul1.

Dacă se iau în considerare valorile rugozității celor două straturi după testare, s-a observat că valoarea acestui parametru pentru suprafața stratului de Cr este mai mică decât cea a suprafeței stratului de Ti. Acest lucru demonstrează o distrugere mai mică a uniformității stratului de Cr în comparație cu cel de Ti, și, din nou, utilitatea acestor straturi subțiri în aplicațiile mecatronice.

5.2. Determinarea diametrului componentelor testate

Pentru determinarea diametrului componentelor mecatronice înainte și după testele de uzură au fost utilizate masina de măsurat lungimi DMS 680, masina de măsurat în coordonate MH-3D (din dotarea **Laboratorului Încercări Lungimi din cadrul Institutului Național de Cercetare Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării**) și sistemul de măsurare noncontact prin scanarea razei laser - AEROEL din dotarea **Centrului de Tehnologii Inteligente de Măsurare din cadrul INCDMTM**.

Valorile diametrelor componentelor mecatronice utilizate în prezentul studiu aplicativ au fost utilizate pentru a determina uzura care apare în urma utilizării acestora.

Astfel, au fost determinate diametrele componentei mecatronice cu diametru mare, diametrele componentei mecatronice cu diametru mic neacoperite din Ru1, diametrele componentei mecatronice cu diametru mare din Ru1 acoperită cu strat de Ti (100 nm grosime) și diametrele componentei mecatronice cu diametru mic din Ru1 acoperită cu strat de Cr (50 nm).

Componentele mecatronice au fost supuse unor teste de uzare prin rotație. Componentă cu diametru mare a fost supusă la 13800 (5 ore) cicluri de rotație, iar componentă cu diametru mic a fost supusă la 8280 (3 ore) de cicluri de rotație. Valorile medii ale diametrului piesei obținute înainte și după testare sunt prezentate în tabelul 17.

Tabel 51. Valoarea medie a diametrului componentei mecatronice cu diametru mare înainte și după testare

Nr. Crt.	Diametru initial	Diametru dupa testare 5 ore
Valoare medie	13.9901281	13.989532

Se poate observa o scădere a diametrului componentei mecatronice, care se datorează uzurii în urma testărilor prin rotație realizate. Este vorba despre o valoare de 0.0005961 mm, adică 596.1 nm (o medie de 0,043 nm distruși în timpul fiecărui ciclu de rotație). Acest lucru implică distrugerea unui strat de 298.05 nm din suprafața componentei mecatronice testate după cele 13800 de cicluri de rotație.

Tabel 18. Valoarea medie a diametrului componentei mecatronice cu diametru mic înainte și după testare

Nr. Crt.	Diametru initial	Diametru dupa testare 3 ore
Valoare medie	9.9963008	9.9960687

Straturi subțiri nanometrice pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale componentelor mecatronice

O valoare mai mică a scăderii diametrului apare în cazul componentei mecatronice cu diametru mic, în urma efectuării celor 8280 de cicluri. Este vorba despre o diferență de 0.0002321 mm, adică 232,1 nm (o medie de 0,028 nm distruși în timpul fiecărui ciclu de rotație). Aceasta înseamnă distrugerea unui strat de 116.05 nm din suprafața componentei mecatronice testate după cele 8280 de cicluri de rotație.

Și componentele mecatronice acoperite cu straturi de Ti (100 nm) și Cr (50 nm) au fost supuse unor astfel de teste, fiind supuse la 2760 (1 oră), 5520 (2 ore) și în final la 8280 (3 ore) de cicluri de rotație. Valorile medii ale diametrului celor două piese acoperite cu Ti și Cr obținute înainte și după testare sunt prezentate în tabelul 53.

Tabel 53. Valorile medii ale diametrelor componentei mecatronice cu diametru mare acoperită cu strat de Ti și a componentei mecatronice cu diametru mic acoperită cu strat de Cr, înainte și după testare

Strat depus	Diametru initial	Diametru dupa testare 1 ora	Diametru dupa Testare 2 ore	Diametru dupa testare 3 ore
Ti (100 nm)	13.9921731	13.992053	13.9919686	13.9918411
Cr (50 nm)	9.9901908	9.9901659	9.9900921	9.9899807

Componenta mecatronică cu diametru mare, acoperită cu un strat de Ti de 100 nm, a avut o scădere a diametrului de 0.000332 mm, adică 332 nm (o medie de 0,04 nm distruși în timpul fiecărui ciclu de rotație). Astfel, este vorba despre o distrugere a unui strat de 166 nm după cele 8280 de cicluri de rotație. După 5520 de cicluri de rotație exista o distrugere a unui strat de 102.25 nm, ceea ce înseamnă că stratul de Ti s-a distrus înainte de 2 ore de testare.

Componenta mecatronică cu diametru mic, acoperită cu un strat de Cr de 50 nm, a avut o scădere a diametrului de 0.0002101 mm, adică 210.1 nm (o medie de 0,025 nm distruși în timpul fiecărui ciclu de rotație). Astfel, este vorba despre o distrugere a unui strat de 105.05 nm după cele 8280 de cicluri de rotație. După 5520 de cicluri de rotație există o distrugere a unui strat de 49.35 nm, ceea ce înseamnă că stratul de Cr s-a distrus după 2 ore de testare.

Din aceste observații se poate concluziona că stratul de Cr, deși este mai subțire, are o rezistență mai mare la testele de uzură. Diferența de rezistență între cele două straturi

nu este foarte mare, însă un strat de Cr cu grosime de două ori mai mică decât cea a stratului de Ti rezistă puțin mai mult unui test de uzură desfășurat în aceleași condiții.

În plus, în cazul componentei mecatronice cu diametru mic a fost distrus un strat de 116.05 nm după cele 8280 cicluri de rotație. Atunci când stratul de Cr este depus pe această componentă și este supusă testelor de uzură, este distrus un strat mai mic, de 105.05 nm. Se observa astfel, faptul că acoperirea cu stratul de Cr cu grosime de 50 nm contribuie la întărirea suprafeței și rezistenței la uzura a componentei mecatronice cu diametru mic.

5.3. Aplicații industriale ale rezultatelor cercetării

Acoperirile au fost testate cu scopul de a crește durata de viață a pieselor realizate până în prezent și de a permite îmbunătățirea calității sistemelor realizate pentru contractori. În general, aceste acoperiri vor putea fi utilizate pentru componente mecatronice, precum angrenaje de mare precizie în construcții miniaturizate, lagăre de mare precizie, componente ale echipamentelor mecatronice pentru măsurare, poziționare și reglare: cai de rulare, ghidaje, grippere, etc., componente pentru echipamente biomedicale, MEMS & NEMS.

Piese testate în cadrul tezei sunt folosite în cadrul INCDMTM pentru realizarea unor sisteme mecatronice pentru **industria auto**, respective pentru SC Automobile Renault – Dacia Pitești; SC Componente Auto Topoloveni, etc. Astfel teza de doctorat este caracterizată ca o teză cu aplicabilitate și implementare industrială.

Astfel, au fost testate substraturi utilizate în mecatronica pentru joje, bușe, elemente de acționare, cepi de măsurare, cepi de contrare, suporturi de poziționare, corp joja (OLC45, Ru11) (figura 14) pentru producerea de lise, etaloane capete palpator, calibre filetate și, poansoane (C120, OSC8). Au fost depuse filme subțiri de Al, Cr, Ti și multistrat Ti+Al prin metoda de evaporare cu fascicul de electroni. Au fost obținute straturi de Al și Cr cu grosimea de 50 nm, strat de Ti cu grosimea de 100 nm și multistrat Ti+Al cu grosimea de 100 nm.

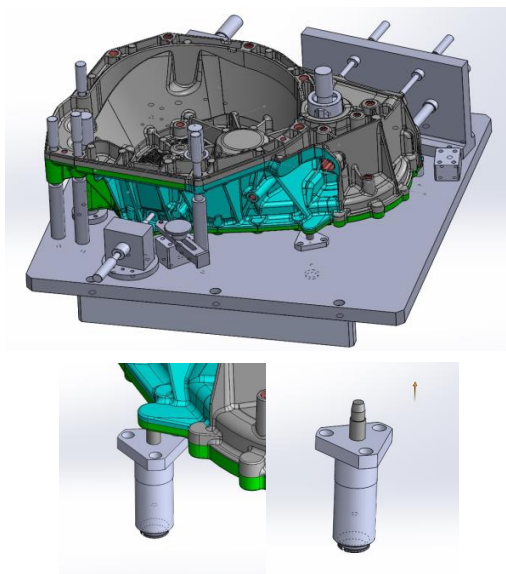


Figura 14. Sisteme de pozitionare piese complexe industria

Astfel, au fost testate substraturi utilizate în mecatronică pentru joje, bușe, elemente de acționare, cepi de măsurare, cepi de contrare, suporti de poziționare, corp joă (OLC45, Ru11) și pentru producerea de calibre filetate și lise, capete palpator, etaloane, poansoane (C120, OSC8). Au fost depuse filme subțiri de Al, Cr, Ti și multistrat Ti+Al prin metoda de evaporare cu fascicul de electroni. Au fost obținute straturi de Al și Cr cu grosimea de 50 nm, strat de Ti cu grosimea de 100 nm și multistrat Ti+Al cu grosimea de 100 nm.

Au fost realizate caracterizări structurale, caracterizări ale topografiei suprafețelor și caracterizări fizico-mecanice (determinarea durității și aderenței straturilor) ale straturilor subțiri obținute experimental și tehnologic. Ținând cont de faptul că în urma acestor caracterizări, straturile de Cr și de Ti au avut proprietăți superioare, acestea au fost testate pe componente mecatronice reale în industria românească. Comportamentul acestor materiale în urma depunerii și testării în condiții normale de utilizare a unor componente mecatronice a fost analizat comparativ. Astfel, a fost demonstrată capacitatea filmelor subțiri nanostructurate de a îmbunătăți caracteristicile mecano-functionale ale componentelor structurilor mecatronice.

**CAPITOLUL VI CONCLUZII. CONTRIBUTII PERSONALE SI DIRECTII DE
CONTINUARE A CERCETARILOR**

Cercetările din cadrul tezei de doctorat intitulată „**STRATURI SUBȚIRI NANOMETRICE PENTRU ÎMBUNĂȚĂȚIREA CARACTERISTICILOR TRIBOLOGICE ALE COMPONENTELOR MECATRONICE**” au avut ca obiectiv stabilirea unor metode și tehnologii pentru depunere de straturi subțiri pentru a asigura o durabilitate crescută a componentelor mecatronice.

În acest sens am întreprins o activitate cuprinzătoare de documentare studiind materii și articole din literatură de specialitate în privința straturilor subțiri nanometrice.

Am observat că pentru a îndeplini cerințele actuale ale producției globale companiile se concentrează asupra metodelor lor, adoptând noi tehnici și căutând noi tehnologii da a-și eficientiza producția și costurile.

În urma concluziilor rezultate din documentare, referitoare la solicitarea severă la care este supus dispozitivul mecatronic de ghidare-preccentrare am început investigații complexe în privința modelării teoretice și experimentale.

În colaborare cu domnul Prof.Univ. dr.ing Gheorghe Gheorghe precum și cu cercetători din cadrul laboratoarelor INCDMTM am dezvoltat o soluție originală care să asigure durabilitatea componentelor mecatronice supuse uzurii.

Sub atenta supraveghere a domnului Prof.Univ. dr.ing Gheorghe Gheorghe am realizat experimentări în cadrul Laboratoarelor : MEMS & NEMS , Încercări Lungimi și în Centrul de cercetare pentru Tehnica Măsurării cu laser CERTIM

Principala performanță obținută în urma tezei de doctorat este demonstrarea capacității filmelor subțiri nanostructurate de a îmbunătăți caracteristicile mecanico-functionale ale componentelor mecatronice.

Informațiile obținute despre materiale în urma acestor studii vor putea fi utilizate, astfel încât să contribuie la obținerea unor produse noi și îmbunătățite, necesare societății românești.

Rezultatele acestor cercetări, în special cele tribologice, ar putea fi extrem de utile inginerilor din domeniul mecatronic, care studiază condițiile de funcționare a componentelor pieselor mecanice și nu numai, stabilind rolul funcțional al fiecărei componente din ansamblu și alegând materialele care corespund funcționării corecte a acestora.

6.1 CONCLUZII

Pe parcursul tezei au fost depuse filme subțiri metalice pe diferite substraturi de oțel și caracterizate din punct de vedere fizico-mecanic și topografic, în final fiind realizate teste aplicative pe componente mecatronice.

Încercările experimentale și analizele efectuate în cadrul derulării prezentei teze au condus la următoare concluzii:

- **în cadrul cercetărilor s-au făcut încercări experimentale de depunere straturi nanometrice, filme subțiri de Ti, Al, Cr, și multistrat Ti+Al prin mai multe metode precum metoda de evaporare cu fascicul de electroni.** Au fost obținute straturi de Al și Cr cu grosimea de 50 nm, strat de Ti cu grosimea de 100 nm și multistrat Ti+Al cu grosimea de 100 nm depuse pe substraturi de tip OLC54, Rul1, C120, OSC8;
- **având în vedere caracteristicile superioare ale straturilor de Cr (grosime 50 nm) și Ti (grosime 100 nm), aceste straturi metalice au fost depuse pe mai multe componente mecatronice pentru realizarea unui studiu aplicativ;**
- **în cadrul cercetărilor au fost realizate multe teste și măsurători pentru caracterizarea fizico-mecanică și topografică a filmelor subțiri depuse rezultând proceduri și tehnologii noi;**
- **considerând obiectivul științific preliminar, au fost analizate rezultatele obținute în urma caracterizării structurilor nanometrice depuse:** caracterizări ale topografiei superficiale rezultate prin acoperire, caracterizări fizico-mecanice (e.g. determinarea durtății) etc;
- **în urma analizei valorilor unor parametri tribologici, precum rugozitate, asimetria suprafeței și coeficient de aplatizare s-a ajuns la concluzia că Cr este filmul subțire depus pe componente mecatronice care prezintă cea mai mare duritate în urma unor teste de uzură;**

- Ți duce și el la creșterea rezistenței la uzura a suprafețelor unor componente mecatronice testate, însă **stratul de Cr** este superior din punct de vedere al proprietăților fizico-mecanice;
- **valoarea pozitivă a indicelui** de asimetrie pentru ambele straturi depuse indica o repartitie de sondaj asimetrică spre dreapta atât înainte cât și după testarea componentelor mecatronice, deci nu o schimbare foarte mare a caracteristicilor suprafețelor în urma testării.
- **coeficientul de aplatizare prezintă valori** care conduc către un exces negativ, ceea ce indică o repartitie platicurtică (curba este aplatizată). Singura excepție este în cazul stratului de Cr în urma testării la uzură, când excesul devine pozitiv, demonstrând o repartitie leptocurtică (înălțimea curbei este mai mare comparativ cu cea normală);
- ținând cont de faptul că valorile medii ale rugozității sunt de ordinul nm s-a considerat că nu a existat o distrugere foarte mare a straturilor depuse. Stratul de Cr depus pe componentele mecatronice testate prezintă cea mai mică valoare a rugozității;
- **în urma testării componentelor mecatronice**, prin analiza variației diametrului pieselor acoperite, **a fost determinată grosimea stratului uzat**. În acest fel, s-a ajuns la concluzia că **stratul de Cr depus prezintă o uzură mai scăzută decât stratul de Ți**, în aceleași condiții reale de testare;
- cu toate că grosimea stratului de Cr este jumătate din cea a stratului de Ți, în urma rezultatelor obținute, se **confirma că stratul de Cr are o duritate și o rezistență superioară la uzura**.

Astfel, a fost demonstrată capacitatea filmelor subțiri nanostructurate (Ți, Cr) de a îmbunătăți caracteristicile funcționale ale componentelor structurilor mecatronice reale pentru mai multe echipamente și instalații mecatronice de măsurare și control inteligent, implementate tribologic și industrial la mai mulți agenți economici din România (SC automobile Dacia Renault, SC Componente auto SA Mioveni, SC Renalt Mecanique Romaine SA).

6.2 DIRECȚII NOI ÎN CERCETARE

Având în vedere rezultatele obținute, consider că direcțiile viitoare în cercetările pentru creșterea durabilității acoperirii de protecție a componentelor mecatronice vor trebui să abordeze:

- determinarea rugozității optime a stratului de bază;
- determinarea durității optime a stratului de bază;
- posibilitatea utilizării unui strat intermediar care să îmbunătățească aderența strat/substrat asigurând astfel o rezistență mecanică și o durabilitate crescută;
- testarea pieselor acoperite în regim hidrodinamic.



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TARGOVISTE
IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

PHD THESIS SUMMARY
NANOMETRIC THIN LAYERS FOR IMPROVING THE
TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF
MECATRONIC COMPONENTS
SUMMARY OF THESIS

PHD SUPERVISOR,

Prof. Dr. Eng. EurIng. Dr.H.C. Gheorghe I. GHEORGHE

PhD Student,

PhD Eng. Valentin GORNOAVA

Târgoviște

Anul 2020



TABLE OF CONTENTS

CHAPTER I. FUNDAMENTALS.....	1
CHAPTER II. INTELLIGENT MECHATRONIC METHODS FOR THIN DEPOSIT LAYERS	4
CHAPTER III.CHARACTERIZATION STUDY OF METHOD AND PROCEDURS.....	6
CHAPTER IV. INTELLIGENT MECHATRONIC PROCEDURES APPLIED IN EXPERIMENTAL RESEARCH	7
4.1. EXPERIMENTAL RESEARCH FOR MATERIALS WITH MICRO AND NANOMETRIC STRUCTURES.....	7
4.2. ESTABLISHING THE THICKNESS OF DEPOSIT LAYERS.....	9
4.3. STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF DEPOSIT LAYERS	10
4.4. DETERMINING THE HARDNESS OF THE THIN DEPOSIT LAYERS	17
4.5. DETERMINING THE ADHESION OF THE DEPOSITED LAYERS.....	19
CHAPTER V. MATERIALS AND EQUIPMENT USED IN TESTING THIN FILMS IN REAL MECHATRONIC SYSTEMS.....	25
5.1. TOPOGRAPHIC CHARACTERIZATION OF MECHATRONIC COMPONENTS.....	26
5.1.1.C TOPOGRAPHIC CHARACTERIZATION OF THE TESTED MECHATRONIC COMPONENTS.....	26
5.1.2. TOPOGRAPHIC CHARACTERIZATION OF THIN LAYERS DEPOSITED ON REAL MECHATRONIC COMPONENTS.....	30
5.2. ESTABLISHING THE DIAMETER OF THE TESTED COMPONENTS	35
5.3. INDUSTRIAL APPLICATIONS OF THE RESEARCH RESULTS.....	38
CHAPTER VI CONCLUSION. PERSONAL CONTRIBUTIONS AND CONTINUING RESEARCH.....	40
6.1 CONCLUSION.....	41
6.2 NEW DIRECTIONS IN RESEARCH.....	43
CURRICULUM VITAE GORNOAVA VALENTIN	



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVISTE
IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

RESEARCH PROGRAMS / PROJECTS.....	47
SCIENTIFIC WORKS.....	49

Keywords: High-tech, thin films, wear, nanostructured materials

Târgoviște

Anul 2020

CHAPTER I. FUNDAMENTALS

Mechatronic applications integrate the principles of physics, chemistry, mathematics and engineering, create fundamental concepts and knowledge from components to systems and develop new products, materials, processes and computer products.

The main thesis objective is the study of materials used for thin film coatings of metal components in friction couplings, used mainly in mechanical and mechatronic applications (high precision gears in miniaturized constructions, high precision bearings, components of mechatronic equipment for measurement, positioning and adjustment : tracks, guides, grippers, etc., components for biomedical equipment, MEMS & NEMS), for prolonging their lifespan and improving the technical and functional characteristics.

This information about materials is subsequently used so as to contribute to the realization of finished materials required or materials required by the company, which is handled by materials engineering.

Surface engineering offers a way to reduce wear in different couplings; the factors that influence this reduction are:

- increasing durability;
- different surface chemistry to reduce adhesive friction;
- coated components that stay unused.
- etc.

Different methods have been tried to obtain these materials with improved properties, which can be used in different fields for various applications, but the most important, so far, is the **depositing of thin layers**.

Thin films with micro and nanometric structures deposited by high-tech mechatronic methods can be used in fields such as mechatronics (components of mechatronic structures), electronics, medicine (implants - dental prostheses, orthopedics), etc.

There is a whole high-tech industry for deposits of materials, micro and nanostructured, as a result of the general trend of shrinking of products with increasing reliability. Studies have been made and progress achieved by using very hard alloys and materials to keep wear to a minimum. The wear decreases sharply with increasing the resistance to cracking of surfaces. Thus, the issue of developing materials with superior

characteristics of high mechanical strength and low wear is found permanently in current research in various industry fields.

The characterization of the surfaces of the deposited materials of the products used in various fields, such as mechatronics, electronics, medicine, etc. is important for a proper functioning, durability and operational reliability.

The equipment and methods used to characterize the surfaces provide information on:

- the topography of the deposited thin layers;
- the physical-mechanical characteristics of the deposited layers (microhardness, electrical, thermal, magnetic characteristics, adhesion, etc.);
- the structural characteristics of the deposited thin films.

Therefore, the main objective of the thesis is to **characterize the surfaces of thin films with micro and nanometric structures** deposited by various physical and chemical methods and intended for mechatronic applications.

From the variety of materials from which mechatronic components are made, **thin micro / nanostructured layers will be deposited on steel sublayer**, which can improve their quality.

The following sublayers are going to be used:

- **OLC45** used in the mechanical and mechatronic industry for the production of dipsticks, bushings, actuators, measuring plugs, counter plugs, positioning brackets, dipstick body etc.;
- **Rul 1** used in the mechanical and mechatronic industry for the production of tools, bearings etc.
- **C120** used in the mechanical and mechatronics industry for the production of threaded and smooth gauges, probe heads, standards, punches, etc.;
- **OSC** used in the mechanical and mechatronics industry for the production of threaded and smooth gauges, probe heads, standards, punches etc.

These materials deposits were chosen in sublayers due to their importance in engineering, creating mechatronic components that are subject, over time, to wear.

The results of these researches, especially the tribological ones, could be extremely useful for mechatronic engineers, who analyze the operating conditions of the overall mechanical parts / components and establish the function of each, choosing the materials that are in line with their application.

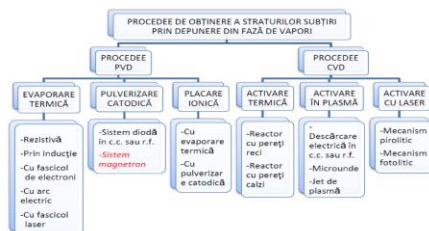
CHAPTER II. INTELLIGENT MECHATRONIC METHODS FOR THIN LAYER DEPOSITS

The deposition methods must take into account the nature of the phenomena that take place in the deposition process, the diversity of the film formation parameters (composition, structure, thickness, volume distribution of the components) and their use parameters (adhesion, wear resistance) , corrosion resistance, porosity).

Thin layer deposition processes are component parts of deposition methods that use the same physico-chemical phenomena, but which differ from each other by certain parameters of the deposition process, which lead to changes in the formation or use of deposits. The deposition of thin layers is used in the manufacture of insulating layers, semiconductor layers, metal layers, etc.

Methods for obtaining thin layers by vapor deposition are physical (Physical Vapor Deposition (PVD) and chemical (Chemical Vapor Deposition (CVD)). The various variants of these methods are shown in Figure 1.

Figure 1. Main processes for obtaining layers in the vapor phase.



Thin films deposited resulted from PVD and CVD processes have extremely varied structures and compositions to satisfy a wide range of applications. The first difference between CVD and PVD is that in a CVD process the reaction takes place on the surface, and in the PVD process the reaction takes place in the atmosphere, the compound being subsequently deposited on the surface. Compared to CVD processes, PVD processes favorise obtaining layers at lower temperatures, in a much larger microstructural and compositional variety. In addition, PVD processes do not pollute the environment.

In the **applications of the doctoral thesis**, the material used for layer deposition must take into account the functional conditions imposed by the finite

component; in certain conditions the materials for deposition can be chosen. When considering the material needed, the compatibility of materials for ensuring optimal adhesion has been considered. The surface of the sample must be processed in order to obtain a very good adhesion of the substrate; this is achieved by removing the impurities after the component is washed with liquid, while the roughness is reduced by grinding or polishing.

**CHAPTER III. PROCEDURAL STUDY OF CHARACTERIZATION
METHODS AND PROCEDURES**

An analytical presentation is proposed, under my conception, for the procedures / procedures / methodologies applicable in the experimental laboratory researches for the physical-mechanical, structural and superficial topography characterization at micro and nanometric coating structures.

Given the scope considered for micro and nano structures of coverage – in mechatronics - knowledge of functional parameters, structures, base layer and coatings, the level of surface finish of deposits applied, is important in achieving the objective.

An adequate mechanical strength of the sublayer, an ultra-fine deposition structure and a high degree of its adhesion, will ensure a proper operation of the friction torques where they are used according to their related compatibility and optimal tribological regime.

The maximum mechanical strength under the conditions of optimal tribological features necessary for the coating layers and ensuring a superior adhesion are also obtained through nanostructured deposits. Depending on the operating characteristics pursued, the characterization procedures / methods are diversified. Accordingly, test equipment is also diversified: for a single feature or for multiple features, with increasing degrees of accuracy and high levels of confidence, with or without IT equipment, etc.

For example there can arise the situation of inspections for characterizing imaging: from optical microscopy to electron microscopy and, more recently, atomic force microscopy or various combinations thereof. Also, the results of experimental tests can be undertaken with mechatronic equipment, stored and / or interpreted with specific, complex software programs, including also statistical processing for interpolating the comparison with parameters stored in databases.

In the paper, the procedural analysis performed for preliminary target objectives will present:

- the main types of procedural tests applicable;
- the procedures / methods selected for the experimental researches and the substantiation of the available options.

CHAPTER IV. INTELLIGENT MECHATRONIC PROCEDURES APPLIED IN EXPERIMENTAL RESEARCH

4.1. Experimental research for materials with micro and nanometric structures

Of all the methods existing so far and studied through the thesis steps I have made and tested depositions resulting from electron beam evaporation, obtained through an original mechatronics procedure. This is a technique used to obtain thin metal deposits.

Electron beam evaporation depositions were made in the **Nanometric Characterization and Structuring Laboratory** within the **National Research-Development Institute for Microtechnology - IMT in Bucharest** with a Temescal FC-2000 system (Figure 2), a versatile evaporation system that accepts a variety of accessories to meet almost any requirement. This system combines maximum flexibility with ease of use. FC-2000 is a system that allows the source to remain in vacuum during sublayer reloading, has a fast cycle, blocked loading.

Figure 2. Temescal FC-2000 - electron beam evaporation deposition system.



The components of this system are: electron beam source, control system, vacuum pumping and control, water supply source system, vacuum chamber, air system. Temescal Control System (TCS) provides the fully integrated control process, recipe based and in vacuum. Operating in any of these password-protected modes, TCS also offers a variable monitoring process, a trend tracking process, and a data archiving process.

TCS automatic mode provides fully automated execution of compound

user-programmed recipes of up to twenty process steps. It also offers independent self-pumping and self-ventilation operations and automatic growth rate testing. TCS manual mode allows the user to set the process parameters, individually operate components and subsystems with full lock protection, and perform non-automated single-film deposition processes.

The TCS service mode provides a low-level control for blocking of valves, pumps, motors, or system power supplies. Temescal's electron beam sources offer improved convenience and reliability that can be easily transferred to applications ranging from microelectronics and optical production to specialized coating. The key to these performance improvements is to cover the pneumatically operated crucible, which automatically lifts before rotation for thick depositions, but which seals all parts of the crucible, including the one which is exposed. The net benefit is represented by the virtual elimination of cross-contamination.

Temescal's fine electron beam controller offers a fully digital operation, internal storage of up to 64 user-defined models, and compatibility with almost any commercially available electron beam cannon. Using a Windows-based programming software and a handheld remote controller, it offers the precision and flexibility required by the most demanding electron beam PVD processes. Using electron beam evaporation, layers of Ti, Cr, Al and multilayer of Ti / Al were deposited on four types of steel samples: OLC45, Ru11, C120 and OSC (Figure 3).

Figure 3. Steel substrates on which nanometric metal layers have been deposited using electron beam evaporation: (a) OLC45; (b) Ru11; (c) C120; (d) CSO



4.2. Determining the thickness of the layers resulted from the deposition process

The quartz crystal microbalance (QCM) method was used to determine the thickness of the deposition thin layers. The measurements were performed in the **Nanometric Characterization and Structuring Laboratory** within the **National Research-Development Institute for Microtechnology - IMT in Bucharest**.

The quartz crystal microbalance (QCM) method can be used in a vacuum, in the gas phase ("gas sensor") and, more recently, in a liquid medium. It is useful for monitoring the deposition rate in vacuum thin film deposition systems. In liquid, it is very effective in determining the affinity of molecules (proteins, in particular) to surfaces operating with recognition sites. Larger entities, such as viruses or polymers, are being investigated as well. The quartz crystal microbalance (QCM) method was also used to investigate the interaction between biomolecules.

Frequency measurements are easily made with high accuracy, therefore it is easy to measure mass densities up to a level below $1 \mu\text{g} / \text{cm}^2$. In addition to measuring frequency, the dissipation factor (equivalent to resonant bandwidth) is often measured to contribute to the performance of the analysis. The dissipation factor is the inverse resonance quality factor, $Q^{-1} = w / fr$; it quantifies the system damping and is related to the viscoelastic properties of the sample.

Quartz belongs to the crystals group that generates a piezoelectric effect. The piezoelectric effect has been used in high power sources, sensors, actuators, frequency standards, motors, etc., and the relationship between the applied voltage and mechanical deformation is well known; this allows an acoustic resonance probe by electrical means. By applying alternating current to the quartz crystal, oscillations will be induced.

The Q factor, which is the ratio between frequency and bandwidth, can reach 106. Such a narrow resonance leads to very stable oscillators and high accuracy in determining the resonant frequency. QCM exploits this feature and the accuracy of detection.

4.3. Structural characterization of the deposited layers

Using the atomic force microscope available at the **MEMS & NEMS Nanometric Mechatronics Laboratory** within the "**National Research and Development Institute for Mechatronics and Measurement Technique - INCDMTM Bucharest**" we analyzed the structural characterization of the nanometric layers. By recording the small deviations of the elastic cantilever, an AFM surface topography can be achieved (Figure 4). Legend: 1 - basic unit; 2 - measuring head; 3 - vibration isolation system; 4 - optical visualization system.

Figure 4. AFM Microscope, NTEGRA Probe NanoLaboratory NT - MDT, Moscow, Russia

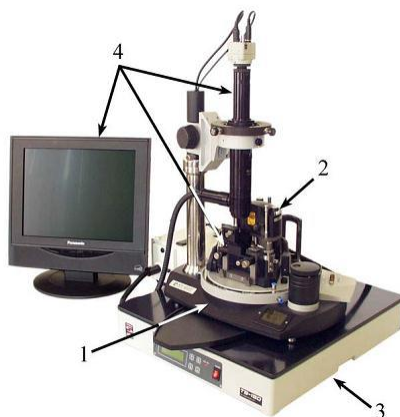
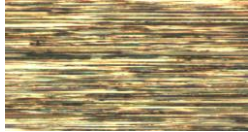
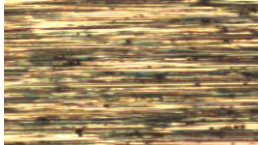
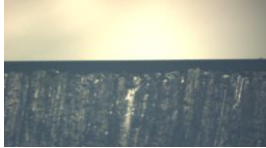
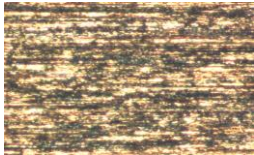
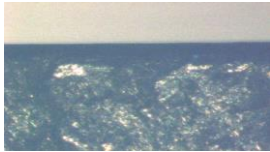
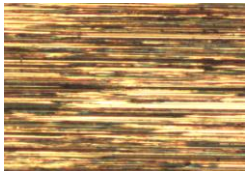
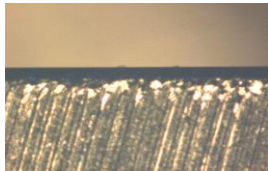


Table 1. Experimental characterization at microscopic level of thin films deposited on the steel sublayers **OLC45 , Rul 1, C120, OSC**

Thin film deposition using the CCI camera of AFM NTEGRA	Joint boundary of a metal sublayer and the thin film deposition
1	2
 Al_50 nm	 Al_50 nm
 Cr_50 nm	 Cr_50 nm
 Ti_100 nm	 Ti_100 nm
 Ti_Al_50_50 nm	 Ti_Al_50_50 nm

Following the experimental characterization it can be seen that all the deposition layers have a degree of uniformity resulting from the process, but, at the

microscopic level, all seem to not have a very flat surface (they could also have a rather high roughness). Also, from the images obtained from the microscopic analysis of the samples, the complete joint between the layer and the sublayer can be observed.

Following the microscopic observations using the CCD camera of AFM NTEGRA, for a better characterization of the layers, scans were performed with the help of the atomic force microscope, which allows the characterization of the surfaces down to the nanometric level. Following the scanning of $50 \times 50 \mu\text{m}$ surfaces on the different films deposited on all substrates, different topographic parameters (roughness, surface asymmetry, flattening coefficient) could be analyzed, which provide information related to the distribution of the deposition layer.

The topographic parameters (surface asymmetry R_{sk} smoothing coefficient R_{ka} , maximum height h_{max} , height in 10 points R_z , surface asymmetry R_{sk} , roughness R_a) that can be determined following the AFM study provide information related to their surface.

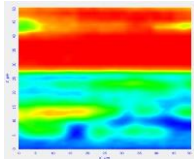
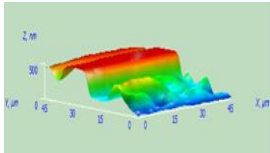
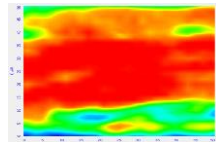
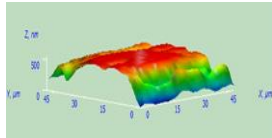
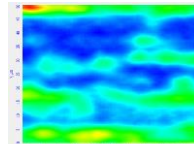
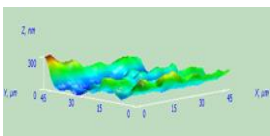
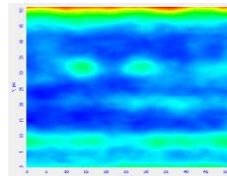
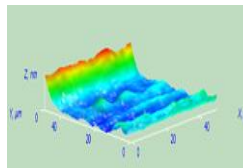
The roughness was used both to determine the tilts (a smooth surface has small tilts, a rough surface has large deviations), to obtain information about the damage and the uniformity of the deposition nanometer layer.

The evaluation of the degree of asymmetry of a distribution is given by the R_{sk} index, while the flattening is given by the R_{ka} index, the R_{sk} asymmetry index can be positive or negative; it all depends on the survey distribution, if it is asymmetric to the right and left; if the distribution is symmetrical then the asymmetry is zero.

Smoothing indices R_{ka} determines the shape of a distribution; a low value of the smoothing index indicates a distribution in which there are fewer categories departed from the average; a high smoothing index indicates a distribution with large "tails"; if it is very close to normal the smoothing coefficient is approximately 3.

In the following table (Table 2) are presented some of the results obtained after the atomic force microscopy characterization of the thin layers of multilayer Ti / Al, Cr, Al, Ti and, deposited on steel sublayers OLC45, Ru11, C120 and OSC; also the calculation of topographic parameters determined using the NTEGRA AFM and its included software are presented.

Table 2. Experimental characterization on AFM of thin film surfaces deposited on the steel sublayer **OLC45 , Rul 1, C120, OSC**

Al_50 nm																												
1	2	3																										
		<table><tr><td>Amount of sampling</td><td>2601</td></tr><tr><td>Max</td><td>536.278 nm</td></tr><tr><td>Min</td><td>0 nm</td></tr><tr><td>Peak-to-peak, S_y</td><td>536.278 nm</td></tr><tr><td>Ten point height, S_z</td><td>263.439 nm</td></tr><tr><td>Average</td><td>321.625 nm</td></tr><tr><td>Average Roughness, S_a</td><td>171.033 nm</td></tr><tr><td>Second moment</td><td>363.044</td></tr><tr><td>Root Mean Square, S_q</td><td>182.598 nm</td></tr><tr><td>Surface skewness, S_{sk}</td><td>-0.0904733</td></tr><tr><td>Coefficient of kurtosis, S_{ka}</td><td>-1.63431</td></tr><tr><td>Entropy</td><td>5.3000</td></tr><tr><td>Redundance</td><td>-9.28039</td></tr></table>	Amount of sampling	2601	Max	536.278 nm	Min	0 nm	Peak-to-peak, S _y	536.278 nm	Ten point height, S _z	263.439 nm	Average	321.625 nm	Average Roughness, S _a	171.033 nm	Second moment	363.044	Root Mean Square, S _q	182.598 nm	Surface skewness, S _{sk}	-0.0904733	Coefficient of kurtosis, S _{ka}	-1.63431	Entropy	5.3000	Redundance	-9.28039
Amount of sampling	2601																											
Max	536.278 nm																											
Min	0 nm																											
Peak-to-peak, S _y	536.278 nm																											
Ten point height, S _z	263.439 nm																											
Average	321.625 nm																											
Average Roughness, S _a	171.033 nm																											
Second moment	363.044																											
Root Mean Square, S _q	182.598 nm																											
Surface skewness, S _{sk}	-0.0904733																											
Coefficient of kurtosis, S _{ka}	-1.63431																											
Entropy	5.3000																											
Redundance	-9.28039																											
Cr_50 nm																												
		<table><tr><td>Amount of sampling</td><td>2601</td></tr><tr><td>Max</td><td>564.279 nm</td></tr><tr><td>Min</td><td>0 nm</td></tr><tr><td>Peak-to-peak, S_y</td><td>564.279 nm</td></tr><tr><td>Ten point height, S_z</td><td>286.076 nm</td></tr><tr><td>Average</td><td>445.671 nm</td></tr><tr><td>Average Roughness, S_a</td><td>112.162 nm</td></tr><tr><td>Second moment</td><td>470.362</td></tr><tr><td>Root Mean Square, S_q</td><td>137.972 nm</td></tr><tr><td>Surface skewness, S_{sk}</td><td>-1.23637</td></tr><tr><td>Coefficient of kurtosis, S_{ka}</td><td>0.378866</td></tr><tr><td>Entropy</td><td>5.8886</td></tr><tr><td>Redundance</td><td>-8.12413</td></tr></table>	Amount of sampling	2601	Max	564.279 nm	Min	0 nm	Peak-to-peak, S _y	564.279 nm	Ten point height, S _z	286.076 nm	Average	445.671 nm	Average Roughness, S _a	112.162 nm	Second moment	470.362	Root Mean Square, S _q	137.972 nm	Surface skewness, S _{sk}	-1.23637	Coefficient of kurtosis, S _{ka}	0.378866	Entropy	5.8886	Redundance	-8.12413
Amount of sampling	2601																											
Max	564.279 nm																											
Min	0 nm																											
Peak-to-peak, S _y	564.279 nm																											
Ten point height, S _z	286.076 nm																											
Average	445.671 nm																											
Average Roughness, S _a	112.162 nm																											
Second moment	470.362																											
Root Mean Square, S _q	137.972 nm																											
Surface skewness, S _{sk}	-1.23637																											
Coefficient of kurtosis, S _{ka}	0.378866																											
Entropy	5.8886																											
Redundance	-8.12413																											
Ti_100 nm																												
		<table><tr><td>Amount of sampling</td><td>2601</td></tr><tr><td>Max</td><td>324.788 nm</td></tr><tr><td>Min</td><td>0 nm</td></tr><tr><td>Peak-to-peak, S_y</td><td>324.788 nm</td></tr><tr><td>Ten point height, S_z</td><td>156.151 nm</td></tr><tr><td>Average</td><td>85.0957 nm</td></tr><tr><td>Average Roughness, S_a</td><td>44.2522 nm</td></tr><tr><td>Second moment</td><td>101.443</td></tr><tr><td>Root Mean Square, S_q</td><td>95.2837 nm</td></tr><tr><td>Surface skewness, S_{sk}</td><td>0.944835</td></tr><tr><td>Coefficient of kurtosis, S_{ka}</td><td>0.606938</td></tr><tr><td>Entropy</td><td>5.88169</td></tr><tr><td>Redundance</td><td>-13.4954</td></tr></table>	Amount of sampling	2601	Max	324.788 nm	Min	0 nm	Peak-to-peak, S _y	324.788 nm	Ten point height, S _z	156.151 nm	Average	85.0957 nm	Average Roughness, S _a	44.2522 nm	Second moment	101.443	Root Mean Square, S _q	95.2837 nm	Surface skewness, S _{sk}	0.944835	Coefficient of kurtosis, S _{ka}	0.606938	Entropy	5.88169	Redundance	-13.4954
Amount of sampling	2601																											
Max	324.788 nm																											
Min	0 nm																											
Peak-to-peak, S _y	324.788 nm																											
Ten point height, S _z	156.151 nm																											
Average	85.0957 nm																											
Average Roughness, S _a	44.2522 nm																											
Second moment	101.443																											
Root Mean Square, S _q	95.2837 nm																											
Surface skewness, S _{sk}	0.944835																											
Coefficient of kurtosis, S _{ka}	0.606938																											
Entropy	5.88169																											
Redundance	-13.4954																											
Ti_Al_50_50 nm																												
		<table><tr><td>Amount of sampling</td><td>2704</td></tr><tr><td>Max</td><td>492.317 nm</td></tr><tr><td>Min</td><td>0 nm</td></tr><tr><td>Peak-to-peak, S_y</td><td>492.317 nm</td></tr><tr><td>Ten point height, S_z</td><td>246.491 nm</td></tr><tr><td>Average</td><td>100.471 nm</td></tr><tr><td>Average Roughness, S_a</td><td>53.3211 nm</td></tr><tr><td>Second moment</td><td>128.419</td></tr><tr><td>Root Mean Square, S_q</td><td>79.9811 nm</td></tr><tr><td>Surface skewness, S_{sk}</td><td>2.38182</td></tr><tr><td>Coefficient of kurtosis, S_{ka}</td><td>6.79082</td></tr><tr><td>Entropy</td><td>5.99307</td></tr><tr><td>Redundance</td><td>-9.37664</td></tr></table>	Amount of sampling	2704	Max	492.317 nm	Min	0 nm	Peak-to-peak, S _y	492.317 nm	Ten point height, S _z	246.491 nm	Average	100.471 nm	Average Roughness, S _a	53.3211 nm	Second moment	128.419	Root Mean Square, S _q	79.9811 nm	Surface skewness, S _{sk}	2.38182	Coefficient of kurtosis, S _{ka}	6.79082	Entropy	5.99307	Redundance	-9.37664
Amount of sampling	2704																											
Max	492.317 nm																											
Min	0 nm																											
Peak-to-peak, S _y	492.317 nm																											
Ten point height, S _z	246.491 nm																											
Average	100.471 nm																											
Average Roughness, S _a	53.3211 nm																											
Second moment	128.419																											
Root Mean Square, S _q	79.9811 nm																											
Surface skewness, S _{sk}	2.38182																											
Coefficient of kurtosis, S _{ka}	6.79082																											
Entropy	5.99307																											
Redundance	-9.37664																											

Conclusion: following the measurements made with the NTEGRA Atomic Force Microscope, it was noted that there are some average values, minimum and maximum, of the parameters obtained for the thin films deposited depending on the substrate, presented as follows.

Nanometric thin layers for improving the tribological characteristics of mechatronic components

Table 3. Minimum, maximum and average values of the roughness of the deposition thin films emerged on the sublayers of different types of steel.

Sublayer	Deposition film	S _a (nm) minimum	S _a (nm) maximum	S _a average (nm)
1	2	3	4	5
OLC45	Al_50 nm	52.6451	105.8387	79.2419
	Cr_50 nm	58.9096	104.3708	81.6402
	Ti_100 nm	65.5779	87.8316	76.7047
	Ti_Al_50_50 nm	63.4798	146.6480	105.0639
Rul1	Al_50 nm	75.2556	101.7819	88.5187
	Cr_50 nm	67.7934	109.4168	88.6051
	Ti_100 nm	71.0554	121.4394	96.2474
	Ti_Al_50_50 nm	45.8398	110.2120	78.0259
C120	Al_50 nm	56.3595	106.7635	81.5615
	Cr_50 nm	63.7867	119.1905	91.4886
	Ti_100 nm	54.0777	98.2362	76.1569
	Ti_Al_50_50 nm	76.5809	72.9521	74.7665
OSC	Al_50 nm	52.4575	81.8669	67.1622
	Cr_50 nm	51.4096	107.6374	79.5235
	Ti_100 nm	28.1934	71.8515	50.0224
	Ti_Al_50_50 nm	53.3211	166.7670	110.0440

Conclusion: following the analysis of average values of the deposition layers roughness, it is noted that the layer with the best surface uniformity is found on the OSC steel sample, the most uniform surface is given by the Titan sublayer, of all deposition thin films with a 50nm thickness aluminum have a uniform shape for this type of steel.

The values obtained following the calculation of the asymmetry index of the thin film depositions on the sublayers from different types of steel are presented in table 4.

Table 4. Minimum, maximum and average values of the asymmetry index of thin film depositions on sublayers of different types of steel

Sublayer	Deposition film	S _{sk} maximum	S _{sk} minimum	S _{sk} average
1	2	3	4	5
OLC45	Al_50 nm	1.0543	-1.1978	-0.0717
	Cr_50 nm	0.9804	-0.9406	0.0199
	Ti_100 nm	1.3628	-1.5943	-0.1157
	Ti_Al_50_50 nm	0.5641	-0.9308	-0.1833
Rul1	Al_50 nm	0.7067	-1.2334	-0.2633
	Cr_50 nm	1.3159	-1.2578	0.0290
	Ti_100 nm	1.2781	-1.1218	0.0781
	Ti_Al_50_50 nm	0.4337	-1.8218	-1.3881
C120	Al_50 nm	1.0363	-1.1348	-0.0492
	Cr_50 nm	1.4193	-1.2899	0.0647
	Ti_100 nm	2.2409	-1.2562	0.4923
	Ti_Al_50_50 nm	0.3165	-1.6869	-0.6851
OSC	Al_50 nm	1.4189	-1.1291	0.1449
	Cr_50 nm	1.2573	-1.3932	-0.0679
	Ti_100 nm	1.5740	-1.2738	0.1502
	Ti_Al_50_50 nm	2.3818	0.04161	1.2117

Conclusion: on the steel sublayers OLC45 thin layers were obtained with different degrees of asymmetry depending on the deposition material. On the steel sublayer type Rul1 the deposited aluminum layer has a negative average S_{sk} asymmetry index (according to table 16) which demonstrates an asymmetric distribution of the sample towards the left. Also on the same type of steel and the values of the asymmetry index of the other two deposition thin layers (Cr and Ti) had average values very close to zero, and it can be considered that it is a symmetrical distribution.

The aluminum deposition layer on the C120 has an average negative value of the S_{sk} asymmetry index (according to table 16), but very close to zero. Thus, a symmetrical distribution of the aluminum layer can be considered. Also on the same type of steel, the values of the asymmetry index of the other two deposited thin layers (Cr and Ti) had positive average values, but slightly different.

Various values of the asymmetry index were also obtained on the OSC steel substrate, depending on the material and the thickness of the deposition layer. The Al and Ti layers have positive values of the asymmetry index, therefore we are dealing with deposits whose sample distributions are asymmetric to the right. The Cr layer has a negative value of this index, having an asymmetric survey distribution to the left. As in the case of the first type of sublayer presented, the values of the asymmetry index are very close to zero for all three deposition layers, so it can be considered that they have a symmetrical distribution. The values obtained from the calculation of the smoothing coefficient of the thin film depositions on the sublayers from different types of steel are presented in Table 5.

Table 5. Minimum, maximum and average values of the smoothing coefficient of thin film depositions on substrates of different types of steel

Sublayer	Deposition film	S _{ka} minimu	S _{ka} maximum	S _{ka} averag	Excess
1	2	3	4	5	6
OLC45	Al_50 nm	0.8471	1.2589	1.0530	-1.9470
	Cr_50 nm	3.2135	-0.0060	1.0637	-1.9363
	Ti_100 nm	2.6318	2.2308	2.4313	-0.5687
	Ti_Al_50_50 nm	0.5400	-0.8028	-0.1313	-3.1313
Rul1	Al_50 nm	-0.2056	1.4852	0.6398	-2.3602
	Cr_50 nm	1.4417	0.3965	0.9191	-2.0809
	Ti_100 nm	1.3086	0.0123	0.6604	-2.3395
	Ti_Al_50_50 nm	-0.8393	1.7311	0.4459	-2.5540
C120	Al_50 nm	1.0823	0.6564	0.8693	-2.1306
	Cr_50 nm	2.7093	0.6000	1.6546	-1.3453
	Ti_100 nm	7.2200	1.1633	4.1916	1.1916

Nanometric thin layers for improving the tribological characteristics of mechatronic components

1	2	3	4	5	6
	Ti_Al_50_50 nm	-0.4691	2.5456	1.0382	-1.9617
OSC	Al_50 nm	2.8380	1.1115	1.9747	-1.0252
	Cr_50 nm	1.8958	1.2973	1.5965	-1.4034
	Ti_100 nm	3.8322	1.0229	2.4275	-0.5724
	Ti_Al_50_50 nm	6.7908	-1.5501	2.6203	-0.3796

Conclusion: Following the analysis of the values obtained in the experiments, it was observed that the values of the calculated excess are both positive and negative, which indicates a leptokurtic and platykurtic distribution. Taking into account the definition and importance of the smoothing coefficient, for the samples studied in these experiments, results were obtained indicating the following conclusions:

- The values obtained after the analysis of the smoothing coefficient show a platykurtic distribution of all the thin film depositions on all 4 types of sublayer;
- The exception is in the case of Ti film of 100 nm thickness, the excess of which has a positive value, therefore a leptokurtic distribution.

4.4. Determining the hardness of the thin deposition layers

The **HMV-2 system** - the hardness of the thin deposition layers was analyzed using the system for measuring the micro-hardness HMV-2 of the **Metallographic Testing Laboratory within the Polytechnic University of Bucharest**.



Figure 5. Automatic reading system for Vickers hardness tests

Following the hardness measurements performed at a temperature of 24 ° C, a humidity of 50%, with a force $F = 98.07\text{mN}$, $HV_{0.01}$ in 10 seconds, **the results from table 6 were obtained.**

Nanometric thin layers for improving the tribological characteristics of mechatronic components

Table 6. Results obtained after measuring the hardness of nanostructured layers deposited on different types of steel.

Layer	Sublayer	Measured points	SD (Standard Deviation)	CV (Deviation coefficient)	M (Hardness average value)
1	2	3	4	5	6
Ti	OLC45	92,4; 90,2; 90,8; 88,0; 96,2	3,05	3,34	91,5
	Rul1	79,5; 79,8; 80,5; 79,6; 75,7	1,90	2,40	79,0
	C120	85,5; 86,8; 86,7; 82,3; 93,3	4,00	4,61	86,9
	OSC8	89,9; 94,4; 87,1; 95,6; 88,0	3,81	4,19	91,0
Cr	OLC45	94,0; 101; 89,5; 93,8; 95,6	4,15	4,38	94,8
	Rul1	97,7; 94,3; 92,7; 95,9; 91,1	2,59	2,75	94,3
	C120	88,4; 91,3; 91,4; 98,9; 102	5,76	6,10	94,4
	OSC8	93,4; 92,9; 97,7; 100; 99	3,21	3,32	96,6
Al	OLC45	81,3; 81,9; 82,3; 80,1; 81,5	0,83	1,02	81,4
	Rul1	83,9; 87,1; 84,6; 86,0; 83,0	1,64	1,93	84,9
	C120	83,4; 86,3; 86,6; 84,7; 82,8	1,69	2,00	84,8
	OSC8	82,9; 83,3; 88,6; 85,6; 81,6	2,76	3,27	84,4
Ti+Al	OLC45	87,4; 84,4; 85,9; 82,2; 79,8	3,01	3,58	83,9
	Rul1	77,6; 84,4; 81,1; 80,8; 82,8	2,54	3,12	81,3
	C120	80,8; 82,9; 86,4; 87,6; 83,7	2,73	3,24	84,3
	OSC8	91,0; 81,6; 82,9; 86,7; 89,3	4,03	4,67	86,3

After analyzing the average hardness values of all deposition layers on different types of sublayers, the main conclusion: the highest average hardness value for all four types of nanometric layers is found on the surface of the OSC8 sublayer. This could indicate a good adhesion of the layers deposited on this type of sublayer.

4.5. Determining the adhesion of the thin deposition layers

CETR-UMT 2 system

The CETR-UMT system from the **Metallographic Testing Laboratory** within the **Polytechnic University of Bucharest** was used to perform measurements and tests in order to determine the adhesion of the thin layers.

Figure 6. CETR-UMT 2 system



The adhesion of the metallic deposition layers on different steel sublayers was determined by scratch tests using the **CETR-UMT 2** system, after a measurement cycle in 3 steps, with a normal force of 5 N, on a length of 5 mm, with a speed of 0.2 mm / s, having a duration of 25s.

The tangential force F_x was used and measured; strong normal F_z ; moving in the normal Z direction; displacement on the tangential direction Y; time T; friction force (value in mode of F_x) F_f ; friction coefficient (F_x / F_z ratio in mode) COF.

Table 7. Average values obtained from adhesion tests and measurements

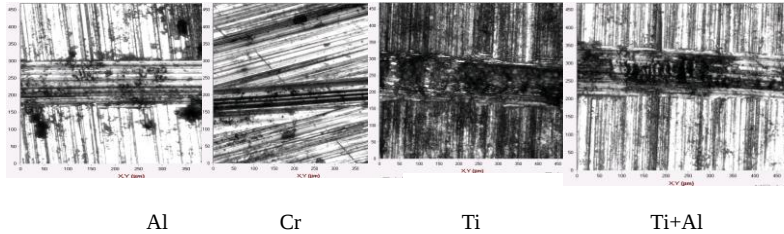
Layer	Sublayer	Time [s]	Depth [mm]	Force F_f [N]	COF
1	2	3	4	5	6
Ti 100nm	OLC45	1,9312	0,01	3,915	0,81
	Rul1	1,9609	0,0105	3,139	0,639
	C120	2,0527	0,012	4,16	0,846
	OSC8	1,656	0,0105	4,482	0,91
Cr 50nm	OLC45	2,6121	0,0185	4,876	0,991
	Rul1	1,606	0,01	3,891	0,802
	C120	2,012	0,013	3,557	0,719
	OSC8	2,3779	0,021	3,461	0,717
Al 50nm	OLC45	3,729	0,0165	3,497	0,727
	Rul1	3,9331	0,01	3,229	0,664
	C120	2,5	0,009	2,972	0,605
	OSC8	4,4307	0,02	6,272	1,267
Ti 50nm + Al 50nm	OLC45	2,053	0,013	3,658	0,739
	Rul1	2,012	0,0125	3,199	0,647
	C120	1,8591	0,01	3,503	0,702
	OSC8	2,0829	0,017	3,354	0,701

ion for two types of substrates. Titanium also has a high adhesion to the C120 substrate.

Regarding the moment of detachment, Al detaches the fastest from the sample of C120 type sublayer, Cr from the Rul1, Ti from the OSC8 type sublayer, and the Ti + Al multilayer detaches the fastest from the C120 substrate.

When considering, mainly, the values of the detachment times on the 4 types of sublayers, it is noted that Al has the latest detachment moment on all 4 steels, which can indicate a good adhesion between it and the steel variants.

For the topographic characterization of the thin deposition layers and subjected to scratch tests, the laser measurement system of surface microgeometry was also used - KLA TENCOR MICRO XAM 100, obtaining similar results. Figure 7 shows some images obtained from such analyzes using a 50x perception head.



The same surfaces can be observed with a rather low uniformity, at micro level, but with a nm level roughness value.

Following the complete topographic characterization of the surfaces of the thin deposition layers subjected to scratch tests, different topographic parameters were determined: roughness R_a , asymmetry of the surface R_{sk} , smoothing coefficient R_{ka} , maximum height h_{max} , height in 10 points R_z , they provide information about the scanned surface. For the interpretation of the obtained data, the average values of the topographic parameters were used. The values of each important topographic parameter determined were analyzed, first of all by a variation of each one depending on the deposition material and the sublayer type.

Table 8. Topographic parameters of thin film surfaces subjected to scratch tests determined using the NTEGRA NT-MDT atomic force microscope and the microscope software - NOVA SPM Software.

Sublayer	Deposition material	R_a average (nm)	R_{sk} average	R_{ka} average	h_{max} average	R_z average
1	2	3	4	5	6	7
OLC 45	Al	112.02	0.465	0.707	568.2	377.5
	Cr	113	1.137	1.250	568	284

Nanometric thin layers for improving the tribological characteristics of mechatronic components

1	2	3	4	5	6	7
	Ti	58	0.899	1.430	367.1	180.3
	Ti+Al	95.37	1.551	2.358	646.6	319
Rul1	Al	81.18	0.861	0.668	488.3	240.2
	Cr	62	0.864	0.982	430	238
	Ti	54	1.162	1.469	397.4	196.7
	Ti+Al	102.39	1.176	0.895	603.5	299.4
C120	Al	124.5	0.955	1.077	660.9	331.5
	Cr	47	1.756	5.795	442	218
	Ti	115	0.343	0.647	653.7	326.6
	Ti+Al	117.74	1.273	1.064	658	327.2
OSC8	Al	167.6	0.410	1.154	696.5	377.5
	Cr	43	1.450	3.998	353	172
	Ti	62	0.415	0.325	317.7	198.8
	Ti+Al	123.79	0.905	0.066	624.4	310.5

On the OLC45 type steel sublayer, the roughness value of the deposition Ti layer indicates that the least damaged layer is on this type of substrate. Taking into account the roughness values of this layer on the other substrates, it results that Ti was slightly damaged after the scratch test when it was also deposited on OSC8, respectively C120. This indicates increased strength; these values can also be influenced by the thickness of the deposited layer.

Between Al and Cr, layers with the same thickness, the roughness value indicates a greater deterioration of Cr on the Rul1 and OLC45 sublayer type. On OSC8 and C120 steel sublayers, Al is more damaged, Cr having a more resistant surface. The Ti + Al multilayer has a roughness value depending on the fact that the top layer is Ti and Al has a better adhesion to the four types of sublayers tested.

The experimental tests and analyzes performed led to the formulation of the following conclusions:

- **I made experimental attempts to deposit nanometric layers, thin films of Al, Cr, Ti and multilayer Ti + Al by the electron beam evaporation method.** Al and Cr layers with a thickness of 50 nm, Ti layer with a thickness of 100 nm and multilayer Ti + Al with

a thickness of 100 nm were obtained, all deposited on sublayers of type OLC54, Ru1, C120, OSC8;

- **during the researches were performed tests and measurements** for the physical-mechanical and topographic characterization of the thin film depositions;
- **the results obtained following the characterization of the deposited nanometric structures were analyzed:** structural characterizations and characterizations of the superficial topography resulting from coating, physical-mechanical characterizations (determination of the hardness and the adhesion of the layers);
- **following the analysis of the values of some tribological parameters**, such as roughness, surface asymmetry and smoothing coefficient, it was concluded that the layers with the most uniform surface are deposited on the OSC8 steel sublayer. It was observed that on all types of steel used as substrate, Ti has the lowest roughness value, followed by Al and then Cr;
- **the positive value of the asymmetry index** for all deposited layers indicates an asymmetric sampling distribution towards right;
- **the smoothing coefficient** presents for all the deposited layers values that lead to a negative excess, which indicates a platykurtic distribution (the curve is flattened);
- **It was observed** that on all 4 types of substrate, **Cr is the thin film deposition that has the highest hardness**. Ti also has a high hardness, but when it is combined with Al, its hardness decreases, given that the top layer is Al, a metal with a lower hardness. On the surface of the OSC8 substrate, the highest average hardness value was obtained for all four types of nanometric layers;
- **after studying the adhesion of the deposition layers, it was concluded** that Al detaches the fastest from the sublayer type C120, Cr from Ru1, Ti from the sublayer type OSC8, and the multilayer Ti + Al detaches the fastest from substrate C120. Considering

effectively the values of the detachment times on the 4 types of sublayers, it was observed that Al has the latest detachment moment on all 4 steel types, which can indicate a good adhesion between it and the steel types;

- **the average values of the asymmetry index**, of the three types of layers deposited on the four types of substrates **had values very close to zero**, most below 0.1; it was concluded that they have a symmetrical distribution. The only exception was in the case of the Ti layer which at a thickness of 100 nm deposited on the C120 type steel substrate, has an asymmetric distribution to the right;
- **the analysis of the smoothing coefficient values of the samples studied** indicates a platykurtic distribution (the curve is flattened) of all the thin films deposition on all four types of substrate; except for the 100 nm thick Ti film, which has a leptokurtic distribution (the height of the curve is higher compared to the regular one);
- **taking into account the fact that the average roughness values** are in the nm category, it was considered **that there was not a very large breakage of the deposited layers**. The Ti layer deposited on all four types of steel has the lowest roughness value of all the deposition layers. The fact that the scratch tests did not break the surface with high intensity meant a good adhesion of the Ti layer on the types of steel sublayers used in the experiments.

The succession of experimental research carried out in this doctoral thesis, starting from the deposition of thin metal films on different steel substrates, to their physical-mechanical characterization followed **the evolution of a nanocomposite coating structure, which can be applied in a mechatronic system**.

CHAPTER V. MATERIALS AND EQUIPMENT USED FOR TESTING THIN FILMS IN REAL MECATRONIC SYSTEMS

Following the tests performed on the laboratory samples, the thin films of Ti (100 nm) and Cr (50 nm) which were considered to have superior properties, were deposited on a real mechatronic system made of Ru11. The behavior of the Ti and Cr layers deposited on mechatronic components (guiding-precentration device) was analyzed in order to obtain information related to the wear resistance of these layers in a real environment.

The tests (including functional tests) were performed in dynamic and real-time conditions, with the aim of evaluating the tribological behavior of the components belonging to a guiding-precentration device, taken as an example in the research on wear of surfaces with Cr and Ti deposits. with surfaces without deposits.

The diagram of the guiding-precentration device is shown in figure 8. The components of this device can be seen in figure 9.

Figure 8. Diagram of the guide-pre-centering device

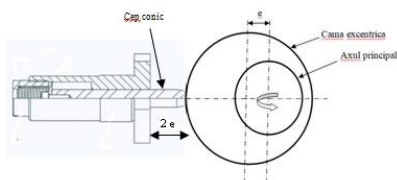


Figure 9. Guided device components tested



The test program included determinations of wear on uncovered and covered bit shanks (large diameter 14 cm, small diameter 10 cm), measurements of surface hardness and determination of diameters before and after wear tests.

5.1. Topographic characterization of real mechatronic components

The topographic characterization of the surfaces of the uncovered real mechatronic components and of the thin layers deposited on their surface and subjected to wear tests in real environment was performed using the NTEGRA NT-MDT atomic force microscope, from the “**MEMS & NEMS Nanometric Mechatronics Laboratory within the National Institute of Development Research for Mechatronics and Measurement Technique – INCDMTM.**”

For a complete topographic characterization of the surfaces, scans of 50×50 μm surfaces were performed with the atomic force microscope and different topographic parameters were determined by using the NOVA SPM Software - microscope software.

The determined topographic parameters are the roughness R_a , the asymmetry of the surface R_{sk} , the smoothing coefficient R_{ku} , the maximum height h_{max} , the height in 10 points R_z (defined in chapter 4.3); these parameters provide information about the scanned surface.

5.1.1. Topographic characterization of the mechatronic components tested

The mechatronic components studied were characterized on a microscopic scale using the NTEGRA video camera of the atomic force microscope. Some of the images obtained are presented below (Figure 10 and Figure 11). Based on the outcome of all these analyzes it was observed an uniformity of the surfaces, but, at the microscopic level, all seem to not have a very flat surface.

Figure 10. Mechatronic component surface with large diameter (14 cm).

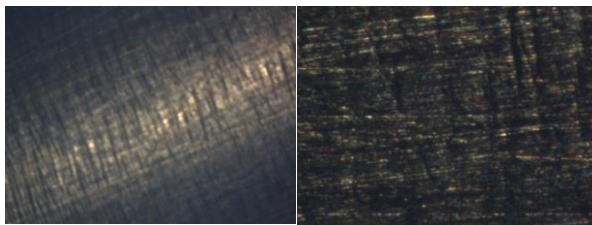
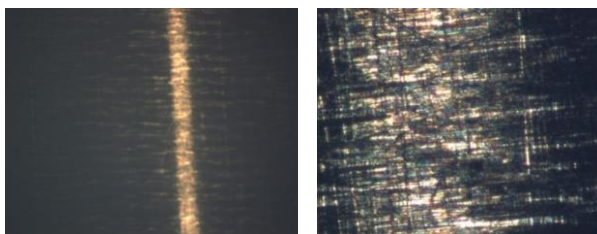


Figure 11. Surface of the mechatronic component with small diameter (10 cm).

Nanometric thin layers for improving the tribological characteristics of mechatronic components



Before the thin layers of Ti and Cr have been deposited on Ru11-type steel sublayers, the mechatronic component was analyzed topographically using an atomic force microscopy. Scans of $50 \times 50 \mu\text{m}$ were performed to determine the above mentioned topographic parameters.

Table 9. Topographic parameters of the large diameter mechatronic component before testing

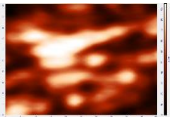
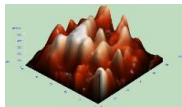
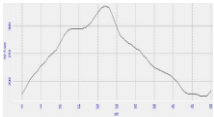
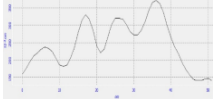
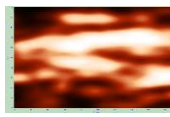
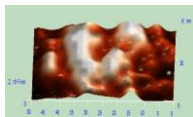
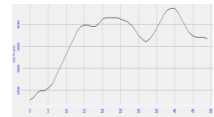
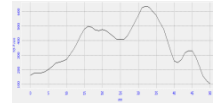
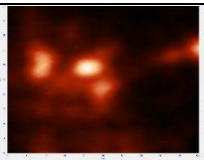
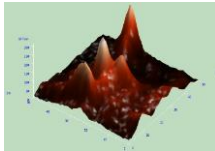
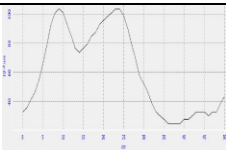
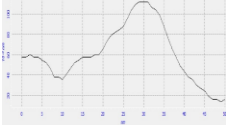
2D/ 3D	Topographic parameters	Profil on x/y axis
1	2	3
 	Amount of sampling 2652 Max 0.525521 nm Min 0 nm Peak-to-peak, Sy 0.525521 nm Ten point height, Sz 0.265003 nm Average 0.24521 nm Average Roughness, Sa 0.103544 nm Root Mean Square, Sq 0.126109 nm Second moment 0.0760313 Surface skewness, Ssk 0.515918 Coefficient of kurtosis, Ska -0.956308 Entropy 7.10798 Redundance -10.6651	 
Topographic of parameters mechatronic component with large diameter after testing		
 	Amount of sampling 2550 Max 0.681392 nm Min 0 nm Peak-to-peak, Sy 0.681392 nm Ten point height, Sz 0.342443 nm Average 0.36894 nm Average Roughness, Sa 0.16356 nm Root Mean Square, Sq 0.189447 nm Second moment 0.170462 Surface skewness, Ssk 0.124034 Coefficient of kurtosis, Ska -1.15943 Entropy 7.42999 Redundance -8.9112	 

Table 10. Topographic parameters of the mechatronic component with small diameter before testing

2D/ 3D	Topographic parameter	Profil on x/y axis
1	2	3
 	Amount of sampling 2601 Max 0.311376 nm Min 0 nm Peak-to-peak, Sy 0.311376 nm Ten point height, Sz 0.147494 nm Average 0.0604796 nm Average Roughness, Sa 0.0377283 nm Root Mean Square, Sq 0.0501872 nm Second moment 0.00617654 Surface skewness, Ssk 1.52377 Coefficient of kurtosis, Ska 2.74746 Entropy 5.78551 Redundance -13.7936	 

Topographic of parameters mechatronic component with small diameter after testing

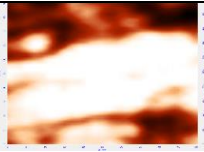
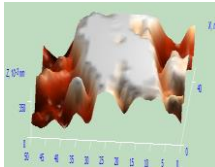
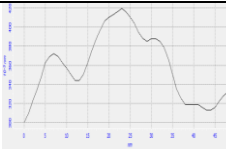
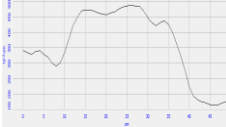
2D/ 3D	Parametrii topografici	Profil pe axa x/y
 	Amount of sampling 2601 Max 0.64126 nm Min 0.153277 nm Peak-to-peak, Sy 0.487984 nm Ten point height, Sz 0.400397 nm Average 0.512005 nm Average Roughness, Sa 0.12327 nm Root Mean Square, Sq 0.138838 nm Second moment 0.281425 Surface skewness, Ssk -0.6748 Coefficient of kurtosis, Ska -0.962076 Entropy 5.83218 Redundance -9.17371	 

Table 11. Mean values of topographic parameters resulted from the characterization of the surfaces of mechatronic components of Ru1 type steel, large diameter and small diameter, before testing.

Surface	Roughness R_a	Index of skew R_{sk}	Smoothing coefficient R_{ka}
Mechatronic component Roll1 with large diameter	0.09803766	0.963071733	1.1939654
Mechatronic component Roll1 with small diameter	0.06636966	1.1821864	1.328807467

The analysis of the Ru1 type steel layer surface of the two parts (large diameter and small diameter) used in the experiments shows that the roughness had average values up to 100 nm. These indicate a smooth surface, with some deviations from the ideal shape present possibly after processing before wear testing. The values of this parameter cannot demonstrate a rough surface.

The index of skew R_{sk} evaluates the degree of asymmetry of the two parts surface. For both large and small diameter parts, the values of this parameter are positive, which indicates an asymmetric probe distribution towards right. Taking into account the smoothing coefficient R_{ka} , the shape of the distribution of the Ru1 steel surface on the two parts was more complex. It takes into account the excess E - the difference between the smoothing coefficient and three. The values of the smoothing coefficient show the two pieces having a negative excess, which indicates a platykurtic distribution (a flattened curve of the histogram that can be achieved).

Table 12. Average values of the topographic parameters obtained from the characterization of the mechatronic components surfaces type Ru1steel, with large diameter and small diameter, after testing.

Surface	Roughness R_a	Index of skew R_{sk}	Smoothing coefficient R_{ka}
Mechatronic component Roll1 with large diameter	0.146217207	0.7138672	-0.318472407
Mechatronic component Roll1 with small diameter	0.077953533	-1.5588624	2.712825933

After the wear tests, the roughness values increase on the surfaces of both parts. The variance of this parameter is greater in the case of the large diameter part, which can demonstrate the existence of a hard surface, damaged after wear tests. The only 11 nm variation that occurs for the smaller diameter part indicates that it had a higher resistance to the scratch test than the part with a higher hardness.

The skew index decreases after wear tests on both parts. The large diameter mechatronic component has a positive R_{sk} index, which indicates an asymmetric probe distribution towards right. The smoothing coefficient R_{ka} decreases in the case of this part, leading to a higher negative stress than before the wear tests, which demonstrates the existence of a platykurtic distribution (a flattened histogram curve that can be achieved).

For the small diameter mechatronic component, the skew index R_{sk} decreases, becoming negative and thus demonstrates the existence of an asymmetric probe distribution towards left. This also indicates the damaging of the surface, resulting in a change in the asymmetry of the surface, after wear tests.

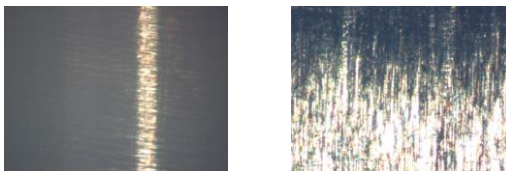
The smoothing coefficient R_{ka} increases in the case of the small diameter mechatronic component, but its value shows the existence of a negative excess, which does not lead to the change of the previous type of distribution. It is a platykurtic distribution (i.e. a flattened histogram curve that can be achieved), which may indicate a lower deterioration of the surface as a result of the testing processes.

5.1.2. Topographic characterization of thin layers deposited on real mechatronic components

After the evaporation deposition with an electron beam, thin layers of Ti and Cr were observed on Ru1 type steel substrates. These layers were 50 nm (Cr) and 100 nm (Ti) thick.

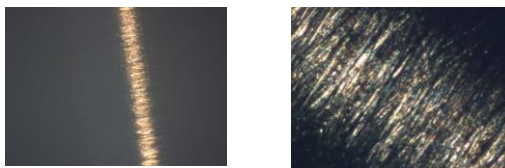
The deposited thin films were characterized at the microscopic scale using the video camera of the NTEGRA atomic force microscope. Some of the resulting images are shown in Figure 12 and Figure 13.

Figure 12. The surface of the Ti layer deposited on the large diameter mechatronic component



Maximum size

Figure 13. The surface of the Cr layer deposited on the small diameter mechatronic component



Maximum size

By scanning with the atomic force microscope some surfaces of $50 \times 50 \mu\text{m}$ present on

the different deposited, the topographic parameters were analyzed, which provide information related to the distribution of the deposited layer and subjected to wear tests. In this way, the detailed characterization of the structure of the different metal films deposited on mechatronic components made of Ru1 type steel was achieved.

Table 13. Topographic parameters of the surface of the Ti layer deposited on the mechatronic component with a diameter of 14 cm before testing

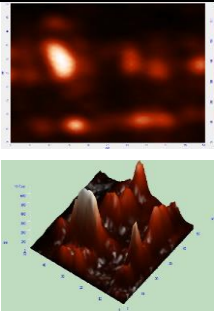
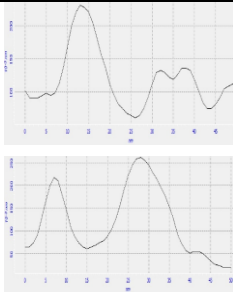
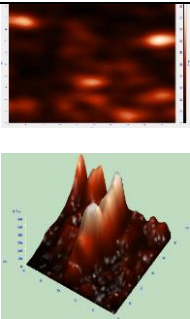
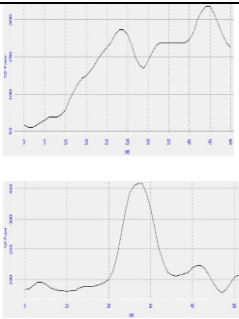
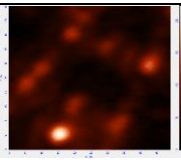
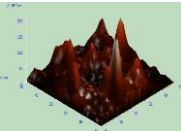
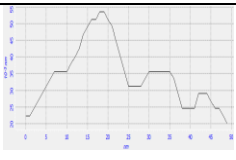
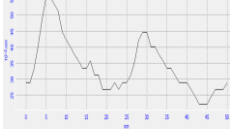
2D/ 3D	Topographic parameters	Profil on x/y axis
1	2	3
	Amount of sampling2601 Max0.683955 nm Min0 nm Peak-to-peak, Sy0.683955 nm Ten point height, Sz0.339936 nm Average0.119485 nm Average Roughness, Sa0.0781562 nm Root Mean Square, Sq0.10958 nm Second moment0.0263064 Surface skewness, Ssk2.13419 Coefficient of kurtosis, Ska5.83106 Entropy6.40448 Redundance-7.51826	
Topographic parameters of the surface of the Ti layer, deposited on the mechatronic component with a diameter of 14 cm, after testing		
	Amount of sampling2652 Max0.641428 nm Min0 nm Peak-to-peak, Sy0.641428 nm Ten point height, Sz0.316231 nm Average0.142121 nm Average Roughness, Sa0.0988654 nm Root Mean Square, Sq0.135658 nm Second moment0.0386015 Surface skewness, Ssk1.76918 Coefficient of kurtosis, Ska2.54393 Entropy6.60075 Redundance-8.23244	

Table 14. Topographic parameters of the surface of the Cr layer deposited on the mechatronic component with a diameter of 10 cm before testing.

2D/ 3D	Topographic parameters	Profil on x/y axis
1	2	3
 	Amount of sampling 2550 Max 0.222782 nm Min 0 nm Peak-to-peak, Sy 0.222782 nm Ten point height, Sz 0.105821 nm Average 0.0341267 nm Average Roughness, Sa 0.0194193 nm Root Mean Square, Sq 0.0265336 nm Second moment 0.00186866 Surface skewness, Ssk 2.0509 Coefficient of kurtosis, Ska 7.41095 Entropy 5.20772 Redundance -16.9473	 

Topographic parameters of the surface of the Cr layer, deposited on the mechatronic component with a diameter of 10 cm, after testing

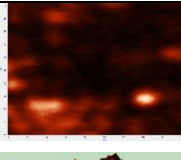
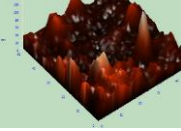
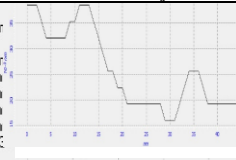
2D/ 3D	Topographic parameters	Profil on x/y axis
 	Amount of sampling 2652 Max 0.134585 nm Min 0 nm Peak-to-peak, Sy 0.134585 nm Ten point height, Sz 0.0605631 nm Average 0.0250819 nm Average Roughness, Sa 0.0143045 nm Root Mean Square, Sq 0.0189031 nm Second moment 0.000986423 Surface skewness, Ssk 1.62948 Coefficient of kurtosis, Ska 3.0254 Entropy 4.14962 Redundance -21.7795	 

Table 15. Average values of the topographic parameters obtained after characterizing the surfaces of the deposited thin layers

Thin layer deposited	Roughness R_a	Index of skew R_{sk}	Smoothering coefficient R_{ka}
Ti 100 nm	0.08146768	1.334335933	2.207712333
Cr 50 nm	0.034456727	1.755032333	4.3030202

Conclusion: the roughness values of the surfaces of the two layers (Ti and Cr) deposited on the two pieces indicate the existence of uniform, well-deposited layers, the Cr layer being much smoother than the Ti layer.

The skew index R_{sk} of the Ti layer deposited on the surface of the large diameter mechatronic component has a positive value, which indicates a probe distribution of the asymmetric layer surface deposited towards right. The smoothing coefficient has a positive value, but the resulting excess is also negative. This indicates a platykurtic distribution (i.e. a flattened histogram curve that can be achieved). Given that the value of the excess is equal to -0.792287667, very close to zero, it approaches a mesokurtic distribution.

The skew index R_{sk} of the Cr layer deposited on the surface of the large diameter mechatronic component has a positive value, which indicates a probe distribution of the asymmetric layer surface deposited towards right. The smoothing coefficient R_{ka} has a positive value, but quite high, so the excess is positive. Taking this into account, it results that the deposited Cr layer has a leptokurtic distribution (the height of the histogram curve that can be obtained is higher compared to the normal one).

Table 16. Average values of topographic parameters obtained after characterizing the surfaces of thin layers deposited and subjected to wear tests

Thin layer deposited	Roughness R_a	Index of skew R_{sk}	Smoothing coefficient R_{ka}
Ti 100 nm	0.09712726	1.165551267	1.500688553
Cr 50 nm	0.0421583	1.693178	3.480143333

After the wear tests, the roughness values of the two layers increase, but with very low values, which indicates an increased strength of the two materials. The difference between the two values (before and after testing) is smaller for the Cr layer, highlighting a higher resistance of this layer compared to the Ti layer.

The skew index R_{sk} of the surface of the Ti layer after the wear tests has a positive value, but lower than that of the deposited layer, which indicates an asymmetric probe distribution towards right. The smoothing coefficient R_{ka} has a lower value than before the tests, but still positive. This leads to a negative excess, indicating a platykurtic distribution (i.e. a flattened histogram curve that can be achieved).

The skew index R_{sk} of the Cr layer surface after wear tests has a positive value, but lower than that of the deposited layer, which indicates an asymmetric probe distribution towards right. Also in the case of this layer, the smoothing coefficient R_{ka} has a lower value than the one before the tests, but still positive. However, the excess obtained is

positive. Taking this into account, it results that the Cr layer deposited and subjected to wear tests has a leptokurtic distribution (the height of the histogram curve that can be obtained is higher compared to the normal one). Given that the value of the excess is equal to 0.48014333, very close to zero, it is close to a mesokurtic distribution.

Following the comparative analysis of the topographic parameters, a decrease of the surface roughness of both tested mechatronic components is observed. In both cases, the resulting difference is:

- 0.049089947 for the Ti layer deposited on the large diameter mechatronic component
- 0.035795233 for the Cr layer deposited on the small diameter mechatronic component

This decrease in roughness, which also means a low surface destruction, demonstrates an increase in the surface resistance of the mechatronic component following the deposition on its surface of the two types of metal layers.

The deposition of the layers and the analysis of the surface roughness of the two components not covered with the roughness of the layer, after the wear tests, caused a decrease of the surface roughness of the tested component which was noted for both materials. This demonstrates once again that the thin layers of Ti and Cr improve the wear resistance of mechatronic components made of Rul1 steel.

By considering the roughness values of the two layers after testing, it was noted that the value of this parameter for the surface of the Cr layer is lower than that of the surface of the Ti layer. This demonstrates a destruction of lower degree in respect of the uniformity of the Cr layer compared to that of Ti, and, again, the usefulness of these thin layers in mechatronic applications.

5.2. Determining the diameter of the tested components

To determine the diameter of the mechatronic components before and after the wear tests, the following machines were used: the length measuring machine DMS 680, the measuring machine in MH-3D coordinates (from the endowment of the **Length Testing Laboratory** within the **National Research and Development Institute for Mechatronics and Measurement Technique**) and the non-contact measuring system by scanning the laser beam - AEROEL from the endowment of the **Center of Intelligent Measurement Technologies** within INCDMTM.

The diameter values of the mechatronic components tested in this thesis study were used to determine the wear that occurs after their use.

Thus, the diameters of the large diameter mechatronic component were determined, together with the diameters of the small diameter mechatronic component not covered in Ru1, the diameters of the large diameter mechatronic component in Ru1 coated with Ti layer (100 nm thickness) and the diameters of the small diameter mechatronic component in Ru1 covered with Cr layer (50 nm).

The mechatronic components were subjected to rotational wear tests. The large diameter component was submitted to 13,800 (5 hours) rotational cycles, and the small diameter component was submitted to 8280 (3 hours) rotational cycles. The average diameter values of the part obtained before and after the test are shown in Table 17.

Table 51. Average values of the diameter of the large diameter mechatronic component before and after testing

Item	Initial diameter	Diameter after 5 hours of testing
Average value	13.9901281	13.989532

A decrease in the diameter of the mechatronic component can be observed, which is due to wear obtained through rotational tests. The value is of 0.0005961 mm, i.e. 596.1 nm (an average of 0.043 nm damaged during each rotation cycle). This involves the damaging of a layer of 298.05 nm present on surface of the mechatronic component tested after the 13800 rotation cycles.

Table 18. The average value of the diameter of the small diameter mechatronic component before and after testing

Item	Initial diameter	Diameter after 3 hours of testing
Average value	9.9963008	9.9960687

A lower value of the diameter decrease occurs in the case of the mechatronic component with small diameter, following the completion of the 8280 cycles. This is a difference of 0.0002321 mm, i.e. 232.1 nm (an average of 0.028 nm destroyed during each rotation cycle). This is equivalent to the destruction of a 116.05 nm layer on the surface of the mechatronic component tested after the 8280 rotation cycles.

Mechatronic components coated with layers of Ti (100 nm) and Cr (50 nm) were also part of similar tests, being exposed to 2760 (1 hour), 5520 (2 hours) and finally to 8280 (3 hours) of rotation cycles. The average values of the diameter of the two parts covered with Ti and Cr obtained before and after the test are presented in table 53.

Table 53. Average values of the diameters of the large diameter mechatronic component coated with Ti layer and the small diameter mechatronic component covered with Cr layer, before and after testing

This layer deposited	Initial diameter	Diameter after 1 hour of testing	Diameter after 2 hours of testing	Diameter after 3 hours of testing
Ti (100 nm)	13.9921731	13.992053	13.9919686	13.9918411
Cr (50 nm)	9.9901908	9.9901659	9.9900921	9.9899807

The large diameter mechatronic component, covered with a 100 nm Ti layer, had a diameter decrease of 0.000332 mm, i.e. 332 nm (an average of 0.04 nm destroyed during each rotation cycle). Thus, it is a destruction of a 166 nm layer after the 8280 rotation cycles. After 5520 rotation cycles there was a destruction of a layer of 102.25 nm, which means that the Ti layer was destroyed before 2 hours of testing.

The small diameter mechatronic component, coated with a 50 nm Cr layer, had a diameter decrease of 0.0002101 mm, i.e. 210.1 nm (an average of 0.025 nm destroyed during each rotation cycle). Thus, it is a destruction of a layer of 105.05 nm after the 8280 cycles of rotation. After 5520 rotation cycles there is a destruction of a layer of 49.35 nm, which means that the Cr layer was destroyed after 2 hours of testing.

It can be concluded that the Cr layer, although thinner, has a higher resistance to wear tests. The difference in resistance between the two layers is not very high, but the Cr layer with a half thickness as compared to the Ti layer lasts for a longer time to a wear test conducted under the same conditions.

In addition, in the case of the small diameter mechatronic component, a layer of 116.05 nm was destroyed after the 8280 rotation cycles. When the Cr layer is deposited on this component and is subjected to wear tests, a smaller layer of 105.05 nm is destroyed. It is thus observed that the coating with the Cr layer with a thickness of 50 nm contributes to

the hardening of the surface and of the wear resistance of the small diameter mechatronics component.

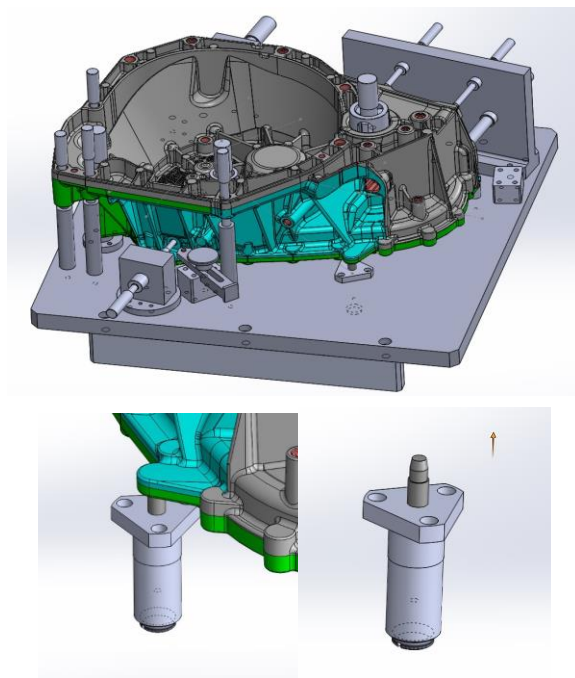
5.3. Industrial applications of research results

The coatings have been tested in order to increase the life of the parts made so far and to allow the improvement of the quality of the systems made for contractors. In general, these coatings can be used for mechatronic components, such as high-precision gears in miniaturized constructions, high-precision bearings, mechatronic equipment components for measuring, positioning and adjusting: raceways, guides, grippers, etc., components for biomedical equipment, MEMS & NEMS.

The parts tested in the thesis are used in INCDMTM for the realization of mechatronic systems for **the automotive industry**, respectively for Automobile Renault - Dacia Pitești and Componente Auto Topoloveni companies, etc. Thus, the current doctoral thesis has high applicability and is suited for industrial implementation.

Thus, the following were tested: substrates used in mechatronics for dipsticks, bushings, actuators, measuring plugs, counter plugs, positioning brackets, dipstick body (OLC45, Rul1) (figure 14) for the production of lyses, probe head standards, threaded gauges and punches (C120, OSC8). Thin films of Al, Cr, Ti and multilayer Ti + Al were deposited by the electron beam evaporation method. Al and Cr layers with a thickness of 50 nm, a Ti layer with a thickness of 100 nm and a Ti + Al multilayer with a thickness of 100 nm were obtained.

Figure 14. Positioning systems for complex parts industry



Structural characterizations, characterizations of the surface topography and physical-mechanical characterizations (analysis of the hardness and the adhesion of the layers) of the thin layers obtained experimentally and technologically were performed. Taking into account the fact that as a result of these characterizations, the Cr and Ti layers had superior properties, they were tested on real mechatronic components in the Romanian industry. The behavior of these materials following the deposition and testing under normal conditions of use of mechatronic components was analyzed comparatively. Thus, the ability of nanostructured thin films to improve the mechano-functional characteristics of the components of mechatronic structures has been demonstrated.

**CHAPTER VI CONCLUSIONS. PERSONAL CONTRIBUTIONS AND
DIRECTIONS FOR FURTHER RESEARCH**

The research performed under the pdh thesis "**NANOMETRIC THIN LAYERS FOR IMPROVING THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MECHATRONIC COMPONENTS**" aimed to establish methods and technologies for deposition of thin layers to ensure increased durability of the component.

A comprehensive documentation activity has been undertaken by studying subjects and articles from the specialty literature regarding nanometric thin layers.

It was noted that in order to meet the current requirements of global production, companies are focusing on the methods used, adopting new techniques and looking for new technologies to make their production and costs more efficient.

Considering the conclusions resulting from the above mentioned documentation, regarding the severe stress to which the mechatronic guiding-precentration device is experiencing, complex investigations regarding the theoretical and experimental modeling were started.

In collaboration with Prof. Dr. Eng. Gheorghe Gheorghe together with researchers from INCDMTM laboratories I have developed an original solution to ensure the durability of the mechatronic components subject to wear.

Under the careful supervision of Prof. Dr. Eng. Gheorghe Gheorghe I performed experiments in the following Laboratories: MEMS & NEMS, Length Tests and in the Research Center for the Laser Measurement Technique (CERTIM).

The main achievement obtained from the current doctoral thesis is the demonstration of the ability of nanostructured thin films to improve the mechanical-functional characteristics of mechatronic components.

The information obtained as a result of these studies will contribute to obtaining of new and improved products, necessary for the Romanian society as a whole.

The results of these researches, especially tribological ones, could be extremely useful for mechatronic engineers, who study the operating conditions of mechanical components and thus, establishing the functional role of each component as a whole and choosing the appropriate materials for proper functioning.

6.1 CONCLUSION

During the thesis, thin metallic films were deposited on different steel sublayers which were characterized from a physical-mechanical and topographic point of view; finally, tests have been conducted on mechatronic components.

The experimental tests and analyzes performed in the course of this thesis led to the following conclusions:

- **during the research, experimental attempts were made to deposit nanometric layers, thin films of Ti, Al, Cr, and multilayer Ti + Al by several methods such as the electron beam evaporation method.** The following layers were obtained: layers of Al and Cr with a thickness of 50 nm, a layer of Ti with a thickness of 100 nm and a multilayer of Ti + Al with a thickness of 100 nm, deposited on OLC54, Ru11, C120, OSC8 sublayers;
- considering the superior characteristics of the layers of Cr (thickness 50 nm) and Ti (thickness 100 nm), **these metallic layers were deposited on several mechatronic components for an applicative study;**
- **during the research, many tests and measurements were performed for the physical-mechanical and topographic characterization of the deposited thin films resulting in new procedures and technologies;**
- considering the preliminary scientific objective, **the results obtained from the characterization of the deposited nanometric structures were analyzed:** characterizations of the surface topography resulting from coating, physical-mechanical characterizations (e.g. determination of hardness) etc;
- **by analysing the values of some tribological parameters, such as roughness, surface asymmetry and smoothing coefficient, it was concluded that Cr is the thin film deposited on mechatronic components that has the highest hardness after wear tests;**

- Ti also leads to increased wear resistance of the surfaces of some tested mechatronic components, but **the Cr layer** is superior in terms of physical and mechanical properties;
- **the positive value of the skew index** for both deposited layers indicates an asymmetric probe distribution to the right both before and after testing the mechatronic components, so not a very large change in surface characteristics after testing.
- **the smoothing coefficient presents values** that lead to a negative excess, which indicates a platykurtic distribution (the curve is flattened). The only exception is in the case of the Cr layer after the wear test, when the excess becomes positive, demonstrating a leptokurtic distribution (the height of the curve is higher compared to the regular one);
- the average roughness values are measured on a nm scale, thus leading to the conclusion that there was not a very large destruction of the deposited layers. The Cr layer deposited on the tested mechatronic components has the lowest roughness value;
- **after testing the mechatronic components**, by analyzing the variance in the diameter of the coated parts, **the thickness of the worn layer was determined**. In this way, it was concluded that **the deposited Cr layer has a lower degree of wear than the Ti layer**, under the same real test conditions;
- although the thickness of the Cr layer is half as compared to the Ti layer, following the results obtained, **it is confirmed that the Cr layer has both a superior hardness and a higher resistance to wear**.

Thus, it was demonstrated the ability of nanostructured thin films (Ti, Cr) to improve the functional characteristics of the components of real mechatronic structures for several mechatronic equipment and installations for intelligent measurement and control, implemented tribologically and industrially at several companies in Romania (Automobile Dacia Renault, Componente Auto SA Mioveni, Renault Mecanique Romaine).

6.2 DIRECTIONS FOR FUTURE RESEARCH

Following the obtained results, I consider that the future directions in the research for increasing the durability of the protective coating of the mechatronic components will have to take into account the following:

- determining the optimal roughness of the base layer;
- determining the optimal hardness of the base layer;
- the possibility of using an intermediate layer to improve the adhesion of the layer / sublayer, thus ensuring an increased mechanical resistance and durability;
- testing of covered parts in hydrodynamic regime.

Curriculum Vitae Gornoava Valentin

Curriculum vitae

Europass



Informații
personale

Nume / Prenume

GORNOAVĂ VALENTIN

Adresă

Bucuresti, str.Savinesti, nr. 5, Complrx Jupiter, Bl. A, et. 7, Ap. 37,
sector 4

Telefon

0761131597; 0724665175

Fax

E-mail

valentine_gornoava@yahoo.com; valentin.gornoava85@gmail.com

Naționalitate

Română

Cetățenie

Română

Data nașterii

11.02.1985

Sex

M

Locul de muncă

vizat / Domeniul

Cercetare – Dezvoltare

ocupational

Experiența

profesională

Perioada

August 2009 – prezent

Funcția sau postul

Cercetător științific gradul 3

ocupat

Nanometric thin layers for improving the tribological characteristics of mechatronic components

Numele și adresa angajatorului	Institutul Național de Cercetare Dezvoltare Pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării (INCDMTM) – Compartiment de Cercetare Dezvoltare Micro si Nanc Tehnologii Mecatronice Șos. Pantelimon nr. 6 ÷ 8, Sector 2, 021631, București, România
Activități și responsabilități principale	➤ Cercetare stintifiica si dezvoltare tehnologica ➤ Participare la realizarea proiectului POSDRU 62144 ➤ Redactare documentatie de realizare
Tipul activității sau sectorul de activitate	Cercetare – Dezvoltare
Educație și formare	
Perioada	2013 - prezent
Numele și tipul instituției de învățământ / furnizorului de formare	Școala Doctorală de Științe Inginerești - Inginerie electrică, Ingineria materiale si Inginerie mecanică, Universitatea Valahia Targoviste
Calificarea / diploma obținută	
Disciplinele principale studiate / competențe profesionale dobândite	Studii doctorale
Nivelul în clasificarea națională sau internațională	ISCED 7
Perioada	2005-2009
Calificarea / diploma obținută	Inginer
Disciplinele principale studiate / competențe profesionale dobândite	Studiul Materialelor, Informatica, Proiectare asistata de calculator

Nanometric thin layers for improving the tribological characteristics of mechatronic components

Numele și
tipul
instituției de
învățământ /
furnizorului
de formare
Nivelul în
clasificarea
națională sau
internațională

UNIVERSITATEA VALAHIA TARGOVISTE, FACULTATEA DE INGINERIA
MATERIALELOR MECATRONICA SI ROBOTICA

ISCED 6

**Aptitudini și
competențe
personale**

Limba
maternă
Limbi străine
cunoscute

română

Engleza

Autoevaluare

*Nivel
european (*)*

engleza

Înțelegere				Vorbire				Scriere	
Ascultare		Citire		Participare la conversație		Discurs oral		Exprimare scrisă	
B2	Utilizator independent	B2	Utilizator independent	B2	Utilizator independent	B2	Utilizator independent	B2	Utilizator independent

() Nivelul Cadrului European Comun de Referință Pentru Limbi Străine*

Competențe
și abilități
sociale

- Capacitatea de a lucra în echipă, adaptare la medii multiculturale, capacitate de comunicare obținută ca urmare a participării la seminarii / conferințe, proiecte de cercetare, sunt o persoană care stabilește ușor relații sociale.

Nanometric thin layers for improving the tribological characteristics of mechatronic components

Competențe și aptitudini de utilizare a calculatorului	Microsoft Office 2013, Catia V5, SolidWorks 2019, ABBYY FineReader 11
Competențe și aptitudini artistice	Capacitatea de a face fotografii
Permis(e) de conducere	Da
Informații suplimentare	Starea civilă Casătorit
Anexe	Lista atașată - proiecte, publicații

PROGRAME / PROIECTE DE CERCETARE

Membru in echipa de cercetare a unor proiecte naționale și internaționale

- NUCLEU – „Cercetari complexe pentru realizarea, caracterizarea si evaluarea capabilitatii aplicative a depunerilor de straturi micro-nanostructurate destinate componentelor biomedicale”, contract nr. 17 N/ 2019, proiect PN 19 24 04 01.
- NUCLEU – „Tipare submicronice utilizand tehnologii de litografie pentru senzori integrați în sisteme cyber-mecatronice”, contract nr. 20 N/ 2018, proiect PN 18 37 03 01;
- NUCLEU – “Acoperiri micro/ nanometrice pentru imbunatatirea caracteristicilor functionale ale componentelor structurilor mecatronice”, contract nr. 3 N/ 2016, A Ad.4/ 2016, proiect PN 16 21 04 01;
- SECTORIAL – “Tehnologii de realizare a lucrarilor agricole utilizand utilaje ecologice”, contract nr. 1PS/2019;
- DEZVOLTARE INSTITUTIONALA – “Dezvoltarea institutionala a INCDMTM pentru cresterea capacitatii si performantei in vederea sustinerii excelentei in cercetare-dezvoltare-inovare pe termen scurt si mediu – EXCEL-MECATRON”, contract nr. 5 PFE/16.10.2018;
- CECURI DE INOVARE – “Optimizarea tehnologiei de prelucrare a carburilor metalice sinterizate cu ajutorul discurilor cu superabrazivi si liant de noua generatie”, contract nr. 202CI/2018;
- CECURI DE INOVARE – “Elaborarea si caracterizarea unor noi retete de materiale avansate din pudre metalice sinterizate pentru aplicatii speciale”, contract nr. 25CI/2017;
- NUCLEU – „Caracterizarea suprafețelor cu structuri micro și nanometrice acoperite prin metode inteligente mecatronice, destinate aplicațiilor biomedicale”, contract nr.5 N/2009, proiect 09.05.03.05/2015.
- Membru in echipa de implementare- PNII - STAR - “Subsisteme pentru nanosateliți”, contract nr. 8/19.11.2012;
- NUCLEU - "Elaborarea unui sistem complex de masurare si localizare la mare distanta, a poziției si vitezei corpurilor, prin utilizarea sistemelor mecatronice de masurare tridimensionala cu laser", Proiect 09.05.01.13/2014;

- NUCLEU - „Caracterizarea suprafețelor cu structuri micro și nanometrice acoperite prin metode inteligente mecatronice, destinate aplicațiilor biomedicale”, contract nr.5 N/2009, act adițional nr. 1/2015;
- NUCLEU - “Actual și perspective privind sistemele de control pentru nanotehnologii” Proiect 09.05.05.02/2009;
- NUCLEU - “Tehnici de procesare si control pentru dezvoltarea microsenzorilor nanostructurati”, Proiect 09.05.03.01/2009;
- NUCLEU - "Metodici mecatronice pentru evaluarea si controlul indicatorilor proceselor de microaschiere abraziva, aliniat cerințelor UE", Proiect 09.05.03.04/2009;
- SECTORIAL MECF - ”Alinierea producției sistemelor pentru nano și microprocesare la cererile și tendințele de dezvoltare în Europa și întreaga lume”, nr. contract 21/839734/2007;
- “Model european de abordare a problemelor de echilibru social si promovare investitii in industria prelucrătoare” Programul SECTORIAL, Contract 18/839734/2007, Colaborator, proiect CDI finalizat;
- 2008-2010 Ctr. 18/2008 PLAN SECTORIAL C-da 11280 Dezvoltarea sistemelor mecatronice de control integrat în procese de prelucrări mecanice și montaj / prezent și perspectivă In cadrul proiectului am participat la elaborare de programe de măsuri pentru implementarea politicilor;
- Responsabil Grup tinta in cadrul proiectului - POSDRU/90/2.1/S/62144 - ”Dezvoltarea educației pentru viabilizarea pieței muncii prin vectori inovatori MECATRONICA-INTEGRONICA (M&I)”, contract POSDRU/90/2.1 /S/62144 / 2010;
- Responsabil arhivare in cadrul proiectului POSDRU 2007-2013 AXA PRIORITARĂ 2 - „Corelarea învățării pe tot parcursul vieții cu piața muncii” „Prin practica ai viitor” - ID 141251

Lista de lucrări Gornoava Valentin

CĂRȚI ȘTIINȚIFICE

1. The Evolution of the Manufacturing Industry, 2010 (Romanian), authors: PROF. UNIV. EURING. DR. ING. Gh. Ion GHEORGHE, Ing. Anton VIERU, Ing. Cristina MARINESCU, Dr. Ing. Iulian MUNTEANU, Ing. Valentin GORNOAVA
2. Manufacturing Industry: Synthesis on Sector Competitiveness, 2010, authors: Prof. Univ. EurIng. Dr. Ing. Gh. Ion GHEORGHE, Ing. Anton VIERU, Ing. Cristina MARINESCU, Dr. Ing. Iulian MUNTEANU, Ing. Valentin GORNOAVA;
3. “The NanoSPRINT Encyclopedia of Nanotechnology, Volumul 1: Carbon Nanotubes”, coautor Citat in Valentin Gornoava, Gheorghe Gheorghe – “The calculation of performance indicators using high-tech technologies for mems & nems from the industry of microelectronics”, The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, no. 45 (2014), 94-97.

LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE

LUCRĂRI PUBLICATE ÎN REVISTE DE SPECIALITATE BDI

- drd. ing Gornoava Valentin., INCDMTM Coautori: prof.univ.dr.ing. Gheorghe I. Gheorghe „Evaluarea indicatorilor de performanta pentru MEMS & NEMS din industria semiconductoarelor si circuitelor microelectronice”. AGIR 2014
- drd. ing. Gornoava Valentin, INCDMTM Coautori: prof.univ.dr.ing. Gheorghe I. Gheorghe „The calculation of performance indicators using high-tech technologies for mems & nems from the industry of microelectronics” MECAHITECH14
- Gornoava Valentin, Brezoi Dragos-Viorel 2 1- INCDMTM Bucuresti, 2- Universitatea Valahia din Targoviste „Metode de acoperire si control ale suprafețelor componentelor protetice de șold” Conferinta Nationala cu participare Internationala MECATRONICA INGINERIE MECANICA

MICROTEHNOLOGII SI MATERIALE NOI - MIM-MMN 27 iunie 2014, Targoviste

- drd. ing.Gornoava Valentin, INCDMTM Coautori: prof.univ.dr.ing. Gheorghe I. Gheorghe „Increase of functional durability of hip prostheses by the use of high-tech technologies” Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics.
- drd. ing.Gornoava Valentin, INCDMTM „The role of high-tech industry in the sustainable development” Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics.
- Gheorghe Ion Gheorghe, Iulian Ilie, C-tin Anghel, Valentin Gornoavă, Adrian Voicu, „Sisteme inteligente adaptronice pentru monitorizarea și configurarea la distanță a procesărilor și proceselor de control integrat”, Simpozionul Stiintific "Progresul Tehnologic - Rezultat al Cercetarii", AGIR, 24 aprilie 2015, Bucuresti, Romania;
- Valentin Gornoava, Gheorghe Ion Gheorghe, Liliana-Laura Badita – „Tribological Characterization of the Nanostructured Thin Films Deposited by Intelligent Methods, for Mechatronic and Biomedical Applications”, Scientific Bulletin of 'Valahia' University. Materials & Mechanics, vol. 14, nr. 11, pg. 67-71 (2016), DOI: 10.1515/bsmm-2016-0010.
- Gornoavă Valentin, Gheorghe Ion Gheorghe, ” Sustainable growth areas with micro and nonometer coated through mechatronic intelligent methodes by applying high-tech technologies” Universitatea Valahia din Targoviste MECATRONICA SI INGINERIE MECANICA, MICROTEHNOLOGII SI MATERIALE NOI” EDITIA a XIII - a, 2015
- Liliana-Laura Badita, Gheorghe Gheorghe, Vasile Bratu, Valentin Gornoava, Marian Vocurek, Aurel Zapciu, Iulian Sorin Munteanu – “Mechanical Characterization of Nanostructured Thin Films Used to Improve Mechatronic Components”, The Scientific Bulletin of VALAHIA University – Materials and Mechanics, vol. 15, nr. 12, pg. 48-54 (2017), DOI 10.1515/bsmm-2017-0009;
- Liliana-Laura Badita, Aurel Zapciu, Valentin Gornoava, Marian Vocurek, Iulian-Sorin Munteanu – “Nanostructured Thin Films Used to Improve

the Tribological Properties in Mechatronic Actuating Systems”, Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Mechanical Engineering ISCAME 2017, pp. 22-28, ISBN 978-963-473-304-1

- Aurel Zapciu, Marian Vocurek, Florin Izvoranu, Iulian Sorin Munteanu, Liliana-Laura Badita, Valentin Gornoavă – “Research on Sinterized Materials from Metal Powder without Cobalt, for Special Uses”, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, nr. 3, pg. 236-244 (2018).
- Liliana-Laura Badita, Valentin Gornoava, Adrian Marian Vocurek, Aurel Zapciu, Iulian Sorin Munteanu – „Thin Films Used to Improve the Fundamental Characteristics of the Mechatronic Components”, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, nr. 3, pg. 127-138 (2018).
- Liliana-Laura Badita, Aurel Zapciu, Valentin Gornoava – „Submicronic patterns using lithographic technologies for future applications in the field of sensors”, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, no. 5, pp. 113-122 (2019).
- Liliana-Laura Badita, Gheorghe Gheorghe, Valentin Gornoava and Aurel Zapciu – “Lithographic technologies for submicronic patterns design applied in microsensors domain”, Nonconventional Technologies Review, vol. 23 nr. 3, pg. 63-68 (2019).
- Aurel Zapciu, Valentin Gornoavă, Liliana Laura Badita, Anton Vieru – „Research on the optimization of sintering metal carbide processing costs using diamond coated disks with resins polyamide binders”, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, nr. 5, pg. 187-193 (2019).

**LUCRĂRI PUBLICATE ÎN VOLUMELE UNOR CONFERINTE
INTERNATIONALE**

- Gheorghe I. Gheorghe, Adrian Voicu, Iulian Ilie, Valentin Gornoava si Al. Constantinescu, „Intelligent Adaptronics for MEMS & NEMS”, DAAAM International Scientific Book, Viena, Austria, 26-29 nov.2014, cotata ISI;
- Gheorghe Ion Gheorghe, Ilie Iulian Gornoavă Valentin, „ADAPTRONIC ENGINEERING USED IN THE CONSTRUCTION OF INTELLIGENT MECHATRONIC EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY” International Conference OPTIROB 2015, 27-30 iunie 2015, Jupiter, Romania, cotata ISI, factor Impact: 0,15;
- Liliana-Laura Badita, Aurel Zapciu, Valentin Gornoava, Marian Vocurek, Iulian-Sorin Munteanu – “Nanostructured Thin Films Used to Improve the Tribological Properties in Mechatronic Actuating Systems”, Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Mechanical Engineering ISCAME 2017, pg. 22-28, ISBN 978-963-473-304-1.