

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
Școala Doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

**UN STUDIU TRIBOLOGIC AL LUBRIFIANȚILOR
FORMULAȚI PE BAZĂ DE ULEI DE RAPIȚĂ ȘI NANOADITIVI
PENTRU REDUCEREA FRECĂRII ȘI UZURII**

Doctorand
ing. Traian Florian IONESCU

Coordonator științific
Prof. univ. dr. ing. Lorena DELEANU

Seria I6: Inginerie Mecanică Nr. 58
Galați 2021

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
Școala Doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

UN STUDIU TRIBOLOGIC AL LUBRIFIANȚILOR FORMULAȚI PE BAZĂ DE ULEI DE RAPIȚĂ ȘI NANOADITIVI PENTRU REDUCEREA FRECĂRII ȘI UZURII

Doctorand

ing. Traian Florian IONESCU

Președinte

Prof. univ. dr. ing. Eugen Victor Cristian RUSU

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Conducător științific

Prof. univ. dr. ing. Lorena DELEANU

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Referenți științifici

Prof. univ. dr. ing. Dan Mihai CONSTANTINESCU

Universitatea POLITEHNICA din București

Prof. univ. dr. ing. Alexandru Valentin RĂDULESCU

Universitatea POLITEHNICA din București

Prof. univ.dr. ing. Iulian Gabriel BÎRSAN

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Seria I6: Inginerie Mecanică Nr. 58

GALAȚI 2021

Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul ȘTIINȚE INGINEREȘTI

Seria I 1: Biotehnologii

Seria I 2: Calculatoare și tehnologia informației

Seria I 3. Inginerie electrică

Seria I 4: Inginerie industrială

Seria I 5: Ingineria materialelor

Seria I 6: Inginerie mecanică

Seria I 7: Ingineria produselor alimentare

Seria I 8: Ingineria sistemelor

Domeniul ȘTIINȚE ECONOMICE

Seria E 1: Economie

Seria E 2: Management

Domeniul ȘTIINȚE UMANISTE

Seria U 1: Filologie- Engleză

Seria U 2: Filologie- Română

Seria U 3: Istorie



UNIUNEA EUROPEANĂ



Instrumente Structurale
2014-2020

Programul Operațional Capital Uman

Axa prioritară 6 - Educație și competențe

Proiect: Burse pentru educația antreprenorială în rândul doctoranzilor și cercetătorilor postdoctorat (BeAntreprenor!)

Cod MySMIS: 124539

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

UN STUDIU TRIBOLOGIC AL LUBRIFIANȚILOR FORMULAȚI PE BAZĂ DE ULEI DE RAPIȚĂ ȘI NANOADITIVI PENTRU REDUCEREA FRECĂRII ȘI UZURII

Autor: ing. Traian Florian IONESCU

Conducător științific: Prof. univ. dr. ing. Lorena DELEANU

Lucrare realizată în cadrul proiectului

„Burse pentru educația antreprenorială în rândul doctoranzilor și cercetătorilor postdoctorat” – **BeAntreprenor!**

Contract nr. 51680/09.07.2019 POCU/380/6/13 – Cod SMIS: 124539



MULȚUMIRI

Mulțumesc, în primul rând, conducătorului științific, doamna prof. univ. dr. ing. Lorena Deleanu, care mi-a oferit îndrumare, încurajare și sprijin pe tot parcursul perioadei de pregătire a tezei de doctorat.

Mulțumesc comisiei de îndrumare a tezei de doctorat, formată din domnul prof. univ.dr. fiz. Adrian Cîrciumaru, domnul ș.l. dr. chim. Dumitru Dima și domnul conf. dr. ing. Constantin Georgescu, pentru sugestiile și sfaturile oferite.

Teza de doctorat nu ar fi fost completă fără sprijinul domnului ș.l dr. ing. Cornel Camil Suciuc din cadrul Universității „Ștefan cel Mare”, din Suceava pentru ajutorul oferit la înregistrarea texturii suprafețelor uzate.

Mulțumesc domnului conf. dr. ing. Alexandru Petrică pentru ajutorul acordat la utilizarea microscopului optic.

Mulțumesc și doamnei ș.l. dr. fiz. Alina Ceoromila pentru sprijinul acordat la utilizarea microscopului SEM.

Doresc să mulțumesc Institutului Național de Cercetări Aeronautice „Elie Carafoli” din București pentru accesul la softurile dedicate și domnului c.s. dr. ing. Cătălin Pîrvu pentru sprijinul acordat la conceperea modelului FEM al tribotesterului cu 4 bile .

Aș dori să mulțumesc firmei Expur București, pentru furnizarea materialului de bază al acestei teze, uleiul de rapiță.

Doresc să mulțumesc și firmei Digital Surf Headquarters care mi-a oferit accesul la utilizarea softului Mountains SPIP 8, cu care au fost investigate texturile suprafețelor uzate.

Cu deosebită recunoștință și dragoste, mulțumesc soției mele, Olimpia și fetiței mele, Patricia-Ioana, care au fost alături de mine, m-au înconjurat cu afecțiunea și răbdarea lor și care m-au sprijinit din toate punctele de vedere în această perioadă.

ing. Traian Florian Ionescu

Cuprins

<i>Mulțumiri</i>	5
Cuprins	7
Introducere.....	9
Capitolul 1. O analiză a cercetărilor existente în domeniul lubrifianților vegetali aditivați	11
1.1. Analiza SWOT a lubrifianților pe bază de uleiuri vegetale.....	11
1.2. Nanoaditivi pentru lubrifianți.....	12
1.3. Rezultate privind aditivarea uleiului vegetal	14
1.4. Modele de nanoaditivi pentru reducerea frecării și uzurii	15
1.5. Nanoparticule de oxizi metalici în lubrifianți	16
1.6. Concluzii	16
1.7. Direcții de cercetare	16
Capitolul 2. Organizarea tezei (nu este inclus în rezumat).....	
Capitolul 3. Evaluarea stării de tensiuni și deformații pe sistemul cu 4 bile cu un model simplificat	17
3.1. Contactul elasto-plastic cu încărcare normală.....	17
3.2. Modele și simulări pentru contactul sferă-sferă sau sferă-plan.....	17
3.3. Modelul propus.....	19
3.4. Rezultatele simulării.....	25
3.4.1. Influența valorii COF asupra stării de tensiuni și de deformații.....	25
3.4.2. Analiza tensiunilor de forfecare.....	29
3.4.3. Influența sarcinii asupra comportării modelului.....	31
3.5. Concluzii.....	39
Capitolul 4. Formularea în laborator a lubrifianților și metodologia de testare pe mașina cu patru bile	40
4.1. Testarea lubrifianților pe mașina cu 4 bile	40
4.2. Parametri tribologici măsurabili prin teste pe tribotesterul cu 4 bile	41
4.3. Obținerea lubrifianților pe bază de ulei de rapiță și nano aditivi TiO ₂ și ZnO. Metodologie de laborator.....	41
4.4. Planul de teste pe mașina cu 4 bile.....	42
4.5. Concluzii	43
Capitolul 5. Comportarea tribologică a lubrifianților formulați, pe tribotesterul cu 4 bile. Rezultate experimentale	44
5.1. Parametri tribologici analizați.....	44
5.2. Evaluarea frecării pentru uleiul de rapiță neaditivat.....	44
5.3. Evaluarea uzurii pentru uleiul de rapiță neaditivat.....	44
5.4. Lubrifianți aditivați cu TiO ₂	46
5.5. Lubrifianți aditivați cu ZnO.....	48
5.6. Temperatura în baia de ulei.....	51
5.7. Analiza rezultatelor experimentale prin hărți ale parametrilor tribologici.....	52
5.7.1. Utilizarea hărților în analiza parametrilor tribologici.....	52
5.7.2. Analiza coeficientului de frecare.....	52
5.7.3. Analiza parametrilor de uzură.....	53
5.7.4. Analiza temperaturii în baia de ulei.....	54
5.8. Teste efectuate în regim sever (la gripare).....	54
5.8.1. Parametrii de încercare pentru lubrifianții testați în regim sever.....	54
5.8.2. Coeficientul de frecare.....	54
5.8.3. Diametrul urmei de uzură.....	56
5.8.4. Temperatura în baia de ulei.....	57
5.9. Concluzii la testele în regim sever.....	58

Capitolul 6. Analiza parametrilor de rugozitate pentru urmele de uzură obținute la lubrifiere cu ulei de rapiță cu nanoaditivi pe mașina cu patru bile.....	59
6.1. Parametrii 2D și 3D.....	59
6.2. Metodologia de înregistrare a texturii urmelor de uzură.....	59
6.2.1 Metodologia de evaluare a texturii suprafeței.....	59
6.3. Studiul texturii suprafețelor uzate ale bilelor cu ajutorul profilometriei 3D.....	61
6.3.1. Analiza parametrilor 3D pentru suprafețele neuzate ale bilelor.....	61
6.4. Analiza parametrilor 3D pentru suprafețele uzate ale bilelor în regim normal și regim sever de lucru.....	62
6.4.1. Regimul normal de testare.....	62
6.4.2. Regimul sever de testare.....	65
6.5. Analiza parametrilor 2D pentru suprafețele uzate ale bilelor.....	68
6.5.1. Regimul normal de testare.....	68
6.5.2. Parametrii 2D în regimul sever de testare.....	70
6.6. Analiza curbelor Abbott-Firestone.....	71
6.7. Corelația dintre parametri de uzură și parametrii texturii suprafeței.....	72
6.8. Concluzii privind studiul texturii urmelor uzate.....	73
Capitolul 7. Concluzii și contribuții personale	74
7.1. Concluzii finale	74
7.2. Contribuții personale	75
7.3. Direcții de cercetare ulterioare.....	76
<i>Bibliografie</i>	<i>77</i>
<i>Lista lucrărilor științifice ale autorului</i>	<i>83</i>

Introducere

Din literatura studiată, concluzia a fost aceea că există o tendință de cercetare privind aditivarea uleiurilor vegetale, pentru utilizarea lor ca lubrifianți, mai ales pentru aplicații specifice cum ar fi industria forestieră, industria navală, industria textilă etc.

Uleiul de rapiță se produce în România și este o resursă prietenoasă cu mediul, atât în ceea ce privește obținerea, cât și aplicațiile.

Formularea pachetului de aditivi într-un lubrifianț pe bază de uleiuri vegetale trebuie să țină seama de cerințele aplicației dar și de compatibilitatea acestuia cu componentele uleiurilor vegetale. Pentru acest studiu, s-au selectat doi nanoaditivi modificatori ai frecării și uzurii, TiO_2 și ZnO , care pot îmbunătăți comportarea tribologică a uleiurilor vegetale.

Atenția trebuie să se concentreze asupra dispersiei nanoaditivului și a selecției dispersantului, iar testarea trebuie efectuată pe baza unei campanii de testare cu variabile adecvate, apropiate de aplicațiile viitoare.

Scopul tezei este de a îmbunătăți comportarea tribologică a uleiului de rapiță nanoaditivat pe baza unor teste pe mașina cu 4 bile prin care performanțele lubrifianților formulați de autor să poată fi comparate cu alte uleiuri minerale sau sintetice. Variabilele selectate au fost concentrația de nanoaditiv și parametrii ai regimului de încercare (în regim normal, forța și viteza de alunecare, în regim sever, forța aplicată pe tribotester).

Comportarea tribologică a fost evaluată prin analiza unor parametri (coeficient de frecare, diametrul urmei de uzură și rata de uzură a diametrului urmei de uzură și parametrii de rugozitate).

Rezultatele raportate sunt satisfăcătoare, dar trebuie extinse pe regimuri de lucru mai apropiate de cele aplicative.

Din rezultatele obținute s-a evidențiat faptul că nanoaditivarea uleiului de rapiță cu TiO_2 și ZnO a redus rata de uzură a diametrului mediu al urmei de uzură numai la sarcini și viteze mari, influența în regim normal fiind redusă, dar în regim sever influența aditivului s-a dovedit benefică, în sensul măririi lungimii cu pantă mică a curbei uzură – sarcină. Raportarea rezultatelor favorizează compararea datelor cu cele din literatura de specialitate și formularea unor recomandări pertinente pentru lubrifianții formulați de autor. În urma acestui studiu, se poate concluziona că aditivarea uleiului de rapiță cu TiO_2 și ZnO ar fi eficace pentru sisteme care funcționează cu sarcini variabile și cu posibile variații mari de regim (spre regimul sever).

În lucrare este prezentat un model simplificat, original, al tribotesterului cu 4 bile, folosindu-se și rezultate experimentale și cunoștințele acumulate din studiul unor lucrări de modelare a contactului. Modelul introduce frecarea ca o tensiune de forfecare între suprafețele în mișcare, după legea lui Coulomb ($\tau_f = \mu \cdot F_n$) și a considerat drept criteriu de similitudine între model și sistemul real, valoarea apropierei pe direcția z a celor două bile ca fiind aceeași cu cea din sistemul real. Modelul propus este util pentru evaluarea distribuției de tensiuni echivalente și deformații, astfel încât să poată estima un interval de lucru pentru parametrii de testare și sesizarea trecerii de la regimul normal de lucru (sarcină acceptabilă pe toată durata de funcționare), la un regim sever (prin identificarea tensiunilor echivalente maxime și a deformațiilor elasto-plastice mari). S-au obținut diferențe relativ mici între cazul cu valoarea coeficientului de frecare de 0,08 și cel în care coeficientul de frecare are valoarea de 0,1, dar cazurile au fost analizate pentru că sunt specifice regimului mixt sau de ungere limită, caracteristic uleiurilor vegetale.

Pe baza documentației făcute asupra aditivării uleiurilor vegetale cu modificatori ai frecării și uzurii, uleiul de rapiță brut a fost ales ca ulei de bază și ca modificatori de frecare și uzură TiO_2 și ZnO . Tehnologia de amestecare/dispersie a nanoparticulelor a fost preluată din lucrări anterioare, realizate în cadrul Centrului de Cercetare „Mecanica și Tribologia Straturilor Superficiale” din cadrul Universității „Dunărea de Jos” din Galați. Spre deosebire de multe alte rapoarte științifice referitoare la testarea lubrifianților, în care se pune accentul pe un singur regim de testare, această teză a avut ca obiectiv testarea lubrifianților nou formulați atât în regim normal, cât și în regim sever. Această abordare nouă

a făcut posibilă evidențierea rolului nanoaditivilor în regimul sever în care, deși nu au format o peliculă continuă, au dus totuși la protejarea suprafețelor de contact și la reducerea parametrului WSD caracteristic testelor pe mașina cu 4 bile.

S-au analizat patru parametri tribologici, coeficientul de frecare, diametrul urmei de uzură, rata de uzură a diametrului urmei de uzură și temperatura în baia de ulei, pentru a avea o imagine cât mai clară a comportării lubrifianților testați. Analizând valorile parametrilor, concluziile sunt formulate separat pentru regimul normal și regimul sever.

Asocierea uzurii cu calitatea suprafeței poate fi calitativă, prin imagini și aspect al curbei Abbott-Firestone, dar și cantitativă, prin valorile obținute și prin funcția de dependență dintre ele.

Tribologii sunt interesați de funcții de forma $f(v, F, t, WSD, \text{parametrul texturii})=0$, din care să se poată evalua o optimizare sau o delimitare a regimului de lucru pe criterii de uzură și calitate a suprafeței. În cazul corelării WSD cu unii parametri ai texturii, s-a observat o grupă de parametri care „reflectă” uzura, dar și alți parametri care sunt aproape insensibili la parametrii tribologici referitori la uzură. Pentru a evalua calitatea unei suprafețe cât mai aproape de realitate cu ajutorul parametrilor 3D, pasul profilometrului trebuie să fie cât mai fin, iar zona de investigație cât mai mare. Studiul de profilometrie se încheie cu câteva observații pertinente privind curba Abbott-Firestone pentru suprafețele uzate în regim normal și regim sever.

Acest studiu a rezultat din faptul că aditivarea uleiurilor vegetale este încă la început, deoarece rezultatele raportate nu sunt atât de eficiente în comparație cu aditivarea alternativei clasice de lubrifianț - uleiurile minerale și uleiurile sintetice. Dar cercetările trebuie continuate, deoarece aceste uleiuri vegetale devin o resursă regenerabilă pentru formularea lubrifianților.

Capitolul 1

O analiză a cercetărilor existente în domeniul lubrifianților vegetali aditivați

1.1. Analiza SWOT a lubrifianților pe bază de uleiuri vegetale

Uleiurile vegetale pot acționa ca aditivi anti-uzură și modificatori de frecare, datorită puternicelor interacții cu suprafețele cu care vin în contact, în special cu suprafețele metalice [88]. Lanțurile moleculare ale acizilor grași și prezența grupelor polare în structura uleiurilor vegetale le oferă acestora posibilitatea de a adera și a se menține pe suprafețele în contact chiar și la regimuri relativ severe [2].

Analiza SWOT pentru introducerea uleiurilor vegetale ca lubrifianți indică faptul că o serie de proprietăți trebuie luate în considerare când se decide această soluție de lubrifiere [51], [24].

Punctele forte sunt următoarele:

- caracter biodegradabil [54],
- protejarea mediului și/sau acceptabilitatea (nepoluant și prietenos cu mediul) [60], [91], [64],
- extragerea din resurse regenerabile sau posibilitatea de reciclare sau reutilizare a lubrifianțului [12],
- index de vâscozitate ridicat [24], [25],
- bune caracteristici de inflamabilitate, puncte de autoaprindere și temperatură ridicată de aprindere pe suprafețe încinse [29], [77].

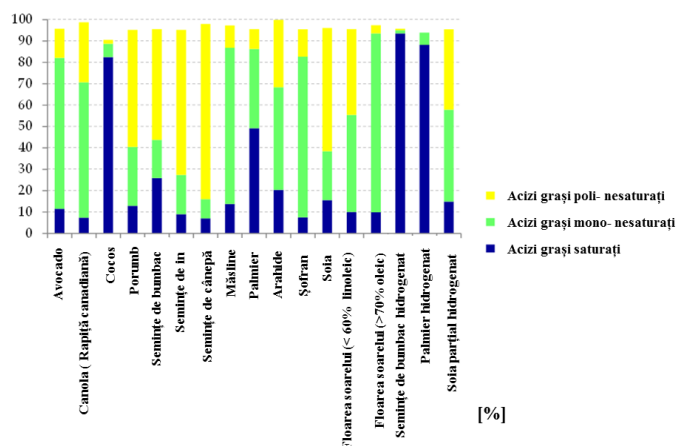


Fig. 1.1. Compoziția de acizi grași pentru uleiurile vegetale [79], [26]

Punctele slabe sunt legate des de compoziția chimică a acestor uleiuri și constau dintr-un amestec de acizi grași (Fig.1.1.), nesaturați, având o mare influență în scăderea fiabilității uleiurilor folosite ca lubrifianți:

- vâscozitate scăzută comparativ cu uleiurile minerale și sintetice [61], [9], [53], [63],
- oxidare și stabilitate chimică scăzută [25], [82]; există o corelație între gradul de nesaturație a uleiurilor vegetale și stabilitatea lor oxidativă [58],
- sensibilitate la umiditate,
- interval de temperatură mai mic decât cel al uleiurilor minerale și sintetice [45],
- multe dintre proprietățile uleiurilor vegetale sunt mai dependente de timp decât cele ale uleiurilor minerale și sintetice,
- proprietăți slabe la temperaturi scăzute pentru uleiurile vegetale decât la alți lubrifianți [83],
- limită scăzută la regimuri severe la testarea pe mașina cu 4 bile [30].

Oportunitățile sunt:

- respectarea unor cerințe mai stricte de protecție a mediului reduce riscurile de poluare și îmbolnăvire,
- riscul ridicat de epuizare a resurselor de petrol și necesitatea înlocuirii acestora este o problemă care trebuie soluționată pentru economia globală.

Amenințările includ:

- nevoia de reproiectare a instalațiilor și echipamentelor care folosesc biofluide, soluție care va crește cu siguranța costul,
- scăderea acceptată a anumitor parametri de funcționare a sistemului (în special sarcina și mentenanța, fără a ne limita doar la acestea),
- prețul încă ridicat (nu trebuie uitat faptul că în anul 1990 uleiurile sintetice erau de zece ori mai scumpe decât uleiurile minerale, dar astăzi proporția este de doar 3 la 1),
- diversitatea specificațiilor de protecție și de siguranță a mediului și o politică globală care nu s-a adresat în mod clar aspectelor de mediu.

1.2. Nanoaditivi pentru lubrifianți

Uleiurile vegetale formulate au folosit aditivi performanți, asemănători cu cei folosiți pentru uleiurile pe bază de petrol, care sunt, în mare parte nepolari, în timp ce trigliceridele sunt extrem de polare. Astfel, aditivii convenționali utilizați pentru uleiurile pe bază de petrol au probleme când sunt adăugați în uleiurile vegetale. Frecvent, trebuie utilizat un agent dispersant.

În final, lubrifianții pe bază de uleiuri vegetale necesită o atenție deosebită pentru a li se crește durata de viață. Trebuie ținut cont și de faptul că apa din orice sistem de lubrifiere existent nu este deloc un factor pozitiv, din mai multe motive printre care se numără faptul că mulți aditivi se vor deteriora, crește formarea de acid, se deteriorează etanșările, se creează rugină și se accelerează uzura. Majoritatea fluidelor pe bază de uleiuri vegetale sunt mai susceptibile la o degradare hidrolitică, al cărui rezultat poate fi formarea de acid, mai susceptibile la precipitarea aditivului și după cum s-a menționat anterior, sunt predispuse la instabilitate oxidativă.

Cu toate acestea, în ultima decadă sau îmbunătățit stocurile de plante oleaginoase (rașiță, soia, ricin), s-au îmbunătățit aditivii din punct de vedere chimic, iar îmbunătățirile aduse cunoștințelor în materie de formulare a lubrifianților au permis dezvoltarea unor produse biodegradabile cu performanțe similare sau mai bune decât fluidele petroliere convenționale.

Nanoaditivarea ar putea crește mărimea sarcinii în lubrifiant, cum ar fi nitrura hexagonală de Bohr (70 nm) în uleiul de motor diesel SAE 15W-40 [1]. S-a adăugat o concentrație de 0,3% volum de surfactant (acid oleic) pentru a preveni sedimentarea nanoparticulelor. Au fost aplicate zece creșteri de sarcină începând cu 196 N și până la 1570 N, fiecare test având o durată de 10 secunde.

Pe baza literaturii recente [67], [66], aditivii pentru lubrifianți pot fi grupați ca în Tabelul 1.1. Aditivii multifuncționali din uleiurile vegetale prezintă un interes deosebit, deoarece pot oferi o îmbunătățire a mai multor caracteristici, în special vâscozitatea și stabilitatea la oxidare.

Tabelul 1.1. Clasificarea aditivilor pentru lubrifianți [58], [66] [78], [69], [90], [56], [18]

Modificatori ai proprietăților chimice	Modificatori ai proprietăților fizice	Modificatori ai uzurii și frecării		Aditivi de extremă presiune
		anorganic	organic	
<ul style="list-style-type: none"> •aditivi pentru controlul depunerilor •aditivi anti-oxidare •detergenți •agenți anti-toxicitate •promotori de biodegradabilitate 	aditivi pentru controlul vâscozității	metale [41], [43], [46]	amide	ZDDP izobutenă sulfurată uleiuri grase și olefine eteri sintetici și sulfurați uleiuri și grasimi sulfurate +olfeină
	depresanți cu punct de curgere	săruri	imide	
	aditivi anti-spumare	oxizi (metalici sau nu)	amine	
	dispersanți	materiale pe bază de carbon	polimeri organici	
			acizi carboxilici și derivați	
			acid stearic și esteri	
			acid fosforic	

1.3. Rezultate privind aditivarea uleiului vegetal

Numărul de aditivi compatibili cu uleiurile vegetale, esteri sintetici sau polialchili glicoli este mic în raport cu numărul de aditivi compatibili cu uleiurile minerale de bază [91]. Un pachet de aditivi pentru uleiurile vegetale poate conține: detergenți, dispersanți, agenți anti-coroziune și anti-oxidare, agenți anti-spumanți, modificatori de vâscozitate și aditivi anti-uzură, agenți de depresurizare pentru

punctul de curgere. Este dificil de determinat influența sinergică a unui astfel de pachet de aditivi, dar aditivii trebuie să fie fără cenușă (să conțină Ca, Na, K, Mg și nu alte metale) și de asemenea să nu fie toxici [37]. Dintre săpunuri, săpunurile pe bază de calciu sunt considerate mai puțin toxice în comparație cu alte tipuri (de exemplu cele pe bază de Li), iar săpunurile în general sunt considerate mai puțin toxice decât agenții de îngroșare pe bază de grafit [33].

Problemele legate de nanoaditivarea uleiurilor vegetale sunt legate, în general, de:

- concentrația, forma și dimensiunea nanoparticulelor,
- compatibilitatea cu compoziția uleiului,
- stabilitatea chimică și fizică în timp și la parametrii regimului de exploatare,
- aglomerarea, sedimentarea și dispersia nanoparticulelor,

- aditivarea scăzută cauzată de apa care ar putea fi prezentă în orice sistem de lubrifiere; apa crește, de asemenea, formarea de acid, deteriorarea etanșărilor, generarea ruginii și accelerarea uzurii. Majoritatea bio-fluidelor sunt sensibile la ruperea hidrolitică, iar rezultatul poate duce la formare de acid și precipitații de aditiv.

Recenziile privind aditivii pentru lubrifianți apar în literatura de specialitate [69], [78], [4], [76], dar doar unele dintre ele tratează influența nanoaditivilor în uleiurile vegetale, rezultatele obținute nefiind suficient de satisfăcătoare în comparație cu aditivarea uleiurilor minerale și sintetice. Adăugarea de nanoparticule la un ulei de bază (mineral, sintetic, vegetal) este o abordare promițătoare pentru îmbunătățirea unor caracteristici, cum ar fi rezistența la frecare și uzură, rezistența termică și chimică, dar literatura de specialitate nu a dat nicio recomandare clară privind formularea și folosirea lubrifianților noi, aditivati, fără teste de laborator, în special cei care ar putea oferi date ce pot fi comparate cu aditivii clasici.

Particule mici de ordinul nanometrilor, de grafit [16], nitrură de bor [1], [44], minerale naturale și sintetice, MoS₂ [13], WS₂ [3] și politetrafluoretilenă (PTFE) [28], au fost folosite atât ca aditivi în lubrifianți, cât și ca lubrifianți solizi. Aceste particule au tendința de a se depune, astfel dimensiunile și proprietățile lor tribologice scad în prezența umidității și a oxigenului, fapt ce duce la limitarea aplicațiilor lor [70]. S-au făcut teste privind adăugarea nanoparticulelor cu dimensiuni cuprinse între 2 și 120 nm în lubrifianți, ca modificatori de frecare, pentru reducerea eficienței a uzurii și frecării. În special, nanoparticule pe bază de compuși de carbon, metal, oxizi de metal, sulfizi metalici, borați metalici, carbonați metalici, compuși din soluri rare și SiO₂, au fost testate [8], [75], [7] și performanțele lor tribologice ca modificatori ai frecării depind de gradul de cristalinitate, mărime, formă și concentrație [78].

Aditivarea uleiurilor vegetale este încă la început. În mare parte s-au studiat doar uleiuri minerale și sintetice. Cu privire la aditivarea uleiurilor vegetale există două tendințe:

- să se folosească aceiași aditivi precum la uleiurile mai sus menționate,
- să se formuleze noi aditivi pe baza caracteristicilor particulare ale uleiurilor vegetale.

Concentrația de nanoaditiv din uleiul de bază influențează puternic proprietățile tribologice, dar pentru a determina valoarea optimă este destul de dificil prin metode teoretice. De aceea se recomandă pe baza testelor de laborator. Deoarece există multe proprietăți tribologice care pot fi afectate prin aditivare, inginerul trebuie să accepte un compromis: să optimizeze un parametru (unul de mare interes), să îmbunătățească alți parametri și să facă acceptabile efectele induse. De exemplu, nanoaditivii pot reduce uzura, dar totodată pot crește valoarea coeficientului de frecare și valoarea temperaturii în contact. Testele pot regla această abordare a sistemului atunci când sunt efectuate cu parametrii în intervalul de aplicare real.

Sunt și cercetători care au inclus oxizii de metal în categoria aditivilor de extremă presiune [35], dar datorită activității lor chimice slabe pe substraturi și datorită faptului că straturile nu sunt continue și stabile în timp, acești aditivi ar putea fi considerați mai degrabă ca făcând parte din categoria aditivilor modificatori de frecare și uzură.

Chiar dacă mulți autori au scris despre formarea unei pelicule netede și compactă formată pe suprafața uzată, responsabilă cu reducerea frecării și uzurii, rapoartele recente și investigațiile SEM, dezvăluie că această peliculă formată nu este continuă, adesea fiind doar un strat instabil cu aspect de pulbere compus din nano-placi, laminate sau nu [15], [16], [85].

În literatura de specialitate sunt raportate teste pe uleiuri vegetale, dar rezultatele sunt pe departe de a fi comparabile și utile pentru aplicații la scară industrială. Informațiile despre comportamentul acestor uleiuri vegetale, în urma testării pe mașina cu 4 bile, sunt de interes, deoarece este posibilă

compararea uleiurilor vegetale, aditate sau nu, cu cele deja utilizate, minerale sau sintetice [39], [30], [12].

1.4. Modele de nanoaditivi pentru reducerea frecării și uzurii

Wu [84] a propus un model care să țină cont de concentrația aditivului (Fig.1.2 și Fig. 1.3). Deși modelul a fost creat pentru utilizarea TiO_2 ca lubrifianț în apă, el poate fi folosit și pentru a explica comportamentul lubrifianților cu alte nanoparticule (oxizi de metal, materiale pe bază de carbon, etc.). Mecanismul lubrifierii cu nano aditivi a fost de asemenea descris și de alți cercetători [85], [16].

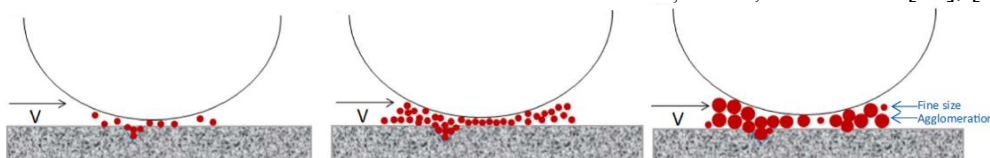


Fig. 1.2. Efectul dimensiunilor particulelor [84]

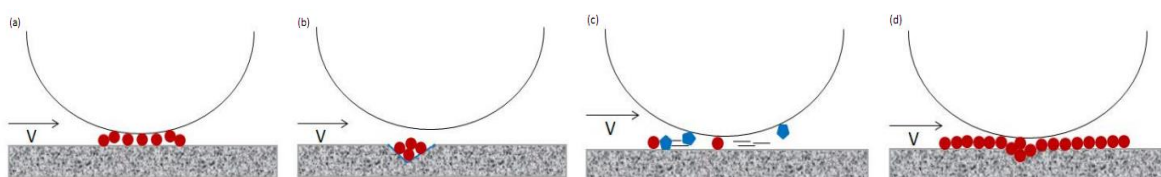


Fig. 1.3. Mecanisme de lubrifiere când sunt folosite nanoparticule în lubrifianț: a) rostogolire, b) umplere, c) lustruire, d) peliculă protectoare [84]

În figura 1.4 sunt prezentate imagini SEM ale urmelor de uzură de pe bilele testate la mașina cu 4 bile pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% TiO_2 , la o viteză de alunecare de 0,69 m/s și la sarcini de 100 N, 200 N și 300 N [16], observându-se că dispersia nanoparticulelor nu este uniformă, iar unele particule se aglomerează, având dimensiuni de ordinul micronilor.

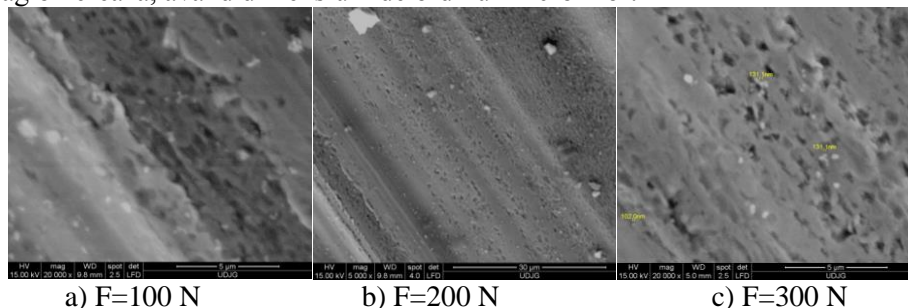


Fig. 1.4. Urme de uzură pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% TiO_2 , $v=0,69$ m/s [16].

În uleiuri se adaugă lubrifianți solizi în scopul reducerii frecării și uzurii. Acest grup de modificatori ai frecării include materiale cu conținut de carbon (fulerene, nanotuburi, grafit, grafen etc.), dar și sulfuri de wolfram și molybden, polimeri fluorinați [78]. Lubrifianții solizi (micro sau nano) ajută în situația în care suprafețele de alunecare au o textură mai aspră, „nivelând” profilul ambelor suprafețe. Sunt recomandați în lubrifianți pentru mișcări reciproce (în cazul inelului pistonului), producând o reducere a uzurii. În general se adaugă lubrifianților care vin în contact cu suprafețele cu care aditivii de extremă presiune nu pot reacționa chimic, cum ar fi polimeri și materiale ceramice și unele dintre compozitele lor [66].

Uleiurile vegetale pot avea o lubricitate excelentă, mult superioară celei a uleiului mineral. Polaritatea uleiului vegetal îmbunătățește caracteristicile de combatere a uzurii, deoarece acestea au afinitate față de metal și protejează suprafața [6]. Unele uleiuri vegetale rafinate, decolorate și dezodorizate (RBD) au trecut testele de uzură prin metoda încercării pe o pompă hidraulică, conform standardelor ASTM D2882 și ASTM D2271, în stare naturală fără aditivi. Aceste uleiuri neaditate se descompun termic din cauza instabilității oxidante a acestora, dar acționează bine în testele de uzură [58].

1.5. Nanoparticule de oxizi metalici în lubrifianți

Diversi oxizi metalici sunt folosiți ca aditivi în lubrifianți. Cel mai des utilizați ar fi TiO_2 , CuO , Fe_3O_4 , ZnO , Co_3O_4 , and Al_2O_3 [81], [68], [47], [42]. Mecanismele lor de lubrifiere sunt similare cu cele ale nanomaterialelor care conțin metale, inclusiv formarea de tribo-filme sau pelicule de adsorbție, efectul de rulare și efectul de aglomerare sau reparare. Un exemplu ar fi utilizarea nanoparticulelor sferice de CuO și TiO_2 ca aditiv în lubrifianți și care prezintă un foarte bun comportament în reducerea frecării și uzurii, în special pentru nanoparticulele de CuO [40]. Reducerea frecării poate fi explicată prin efectul viscozității la temperatură scăzută și al efectului de rulare la temperatură ridicată, iar mecanismul de uzură este asociat cu depunerea nanoparticulelor de CuO pe suprafața de frecare, care poate reduce tensiunea la forfecare și îmbunătăți proprietățile tribologice.

Tabelul 1.2 prezintă câteva studii în care este folosit TiO_2 ca aditiv de reducere a frecării și uzurii.

Tabelul 1.2. Cercetări și publicații cu TiO_2 ca aditiv

Autori/ An/ Referințe	Lubrifianțul			Teste				Rezultate	
	Ulei de bază	Aditiv		Tester	Sarcina	Viteza	Tempera- tura uleiului	Reducerea uzurii	Reducere a frecării
		Mărime	Concen- trația					Observații	
[68]	mine- ral	20-25 nm	0,25wt %	4 bile	14,7 N	0,05 m/s	tempe- ratura camerei	21%	
[86]	ulei în apă	30 nm	0, 0,5, 2, 4, 6 wt%	bilă pe disc	50 N	50 mm/s	80 °C	redușă semnificativ	
[34]	lichid de tăiere pe bază de apă	20 nm	0,1-1,6 wt%	4 bile	147 N	1440 rpm		34,8%	de la 0,17 la 0,04
[52]	ulei de motor multigrad	10-25 nm	1,5 wt%	pin pe disc	40, 60, 90 N	0,5, 1 și 1,5 m/s		redușă semnificativ	
[39]	ulei de bază API 1509	50-100 nm	0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 wt%	4 bile/ bilă pe disc	100 N		75 °C	redușă în comparație cu uleiul de bază	
[90]	trimetilo propan ester/ulei de palmier		0,1 wt%	4 bile	160 kg	1200 rpm	tempe- ratura camerei	11%	15%

Tabelul 1.3 prezintă câteva studii în care este folosit ZnO ca aditiv de reducere a frecării și uzurii

Tabelul 1.3. Cercetări și publicații cu ZnO ca aditiv

Authors/ Year/ Reference	Lubricant			Tests				Results	
	Base oil	Additiv		Tester	Wear reduction Load	Friction reduction speed	Oil temperature	Observations	
		Size	Concen- tration						
[69]	Mineral, PAO, floarea soarelui, soia	11,71 nm	0,5 wt%	Instalație de testare alternativă de înaltă frecvență	10 N		50 °C	Eficient cu uleiul mineral	
[47]	lubrifiant	4,04 nm	1,2 wt%	Pin pe disc	392 N	1200 rpm	75 °C	31,2%	9,9%
[57]		24 nm		Bilă pe disc	5 N	5 cm/s	25-400 °C	Nu se modifică semnificativ COF	

Comportamentul anti-uzură al nanoparticulelor de aditiv poate fi atribuit mecanismului de tribo-aglomerare. Explicația posibilă ar fi că tribo-aglomerarea nanoparticulelor poate apărea pe suprafața de

uzură. Nanoparticulele se depun pe suprafața de frecare și se fixează pe micro- spațiile din suprafața. Prin urmare, se formează o peliculă protectoare datorită acestor nanoparticule pe suprafața de contact la o temperatură mai mare în timpul frecării. Pelicula care s-a format, separă cele două zone și acționează ca zonă portantă care umple urmele de uzură și protejează suprafața metalică de contact.

Când cel puțin o dimensiune a particulelor este în gama nanometrică, metalele vor prezenta proprietăți remarcabile și neobișnuite, fie sub formă de pulbere, fie sub formă de filme subțiri. S-au efectuat cercetări privind prepararea, caracterizarea structurii, proprietățile și aplicarea nanoparticulelor metalice. În tribologie, s-a anticipat că aceste nanoparticule metalice prezintă proprietăți bune de lubrifiere, atunci când sunt folosite ca aditivi în lubrifianți din următoarele motive:

- nanoparticulele metalice sunt atât de mici încât se poate obține o dispersie coloidală stabilă în uleiuri prin metode adecvate, care pot evita precipitarea cauzată de gravitație;
- la formarea unei dispersii stabile, bine proporționate, nanoparticulele metalice sunt mai susceptibile de a fi prinse pe suprafața de frecare;
- nanoparticulele metalice pot fi depuse pe suprafața de frecare.

1.6. Concluzii

Din literatura studiată [69], [78], [5], [76], există o tendință de cercetare privind aditivarea uleiurilor vegetale, în special pentru lubrifiere. Adăosul de nanoparticule (TiO_2 , ZnO) poate îmbunătăți proprietățile tribologice ale uleiurilor vegetale. Frecarea nu este întotdeauna redusă, dar creșterea coeficientului de frecare este acceptabilă deoarece este însoțită de o reducere substanțială a uzurii. Atenția trebuie să se concentreze asupra dispersiei nanoaditivului și a selecției dispersantului.

Rezultatele raportate sunt încă neconcludente, iar aplicațiile acestor uleiuri se bazează mai mult pe inerția pieței sau pe experiența practică a utilizatorilor. În ciuda avantajelor folosirii nanoparticulelor de aditiv analizate în această lucrare, există, de asemenea, unele provocări legate de aplicațiile lor, care ar putea forma o cercetare viitoare:

- pregătirea și menținerea unor amestecuri omogene de particule și uleiuri de nanostructură. Forța puternică van der Waals între particule îi determină să se agregeze în soluții; prin urmare, trebuie investigate diferite tehnici de modificare pentru stabilizarea nanoparticulelor din uleiurile vegetale pentru a produce lubrifianți, stabili fizic și chimic;
- testarea în condiții adecvate, mai aproape de aplicațiile viitoare ;
- raportarea rezultatelor într-o manieră care permite compararea datelor și interpretarea acestora în tribosistemele reale.

Concluzia este că, aditivarea uleiurilor vegetale este încă la început, deoarece rezultatele raportate nu sunt atât de eficiente în comparație cu aditivarea alternativei clasice - uleiurile minerale și chiar mai puțin, comparativ cu uleiurile sintetice. Dar cercetările trebuie continuate, deoarece aceste uleiuri vegetale devin o resursă reală pentru stocurile de bază pentru lubrifianți.

1.7. Direcții de cercetare

Uleiul de rapiță se produce în România și este o resursă prietenoasă cu mediul.

Scopul tezei este de a îmbunătăți comportarea tribologică a uleiului de rapiță nanoaditivat pe baza unor teste pe mașina cu 4 bile prin care performanțele lubrifianților formulați de autor să poată fi comparate cu alte uleiuri minerale sau sintetice.

Autorul își propune:

- să proiecteze o tehnologie de laborator pentru aditivarea uleiului de rapiță cu ZnO și TiO_2 ,
- să formuleze un plan de testare care să includă două regimuri, regim normal de lucru și regim sever pe baza unui set de variabile (concentrația de nanoaditivi, viteza de alunecare și sarcina pe tribosterul cu 4 bile).
- să evalueze comportarea tribologică prin analiza unor parametri (coeficient de frecare, diametrul urmei de uzură și rata de uzură a diametrului urmei de uzură, parametri de rugozitate).

Capitolul 3

Evaluarea stării de tensiuni și deformații pe sistemul cu 4 bile cu un model simplificat

3.1. Contactul elasto-plastic cu încărcare normală

Teoria plasticității a încercat să apropie răspunsul teoretic al unui model de corp solid de răspunsul real, pentru a o utiliza în evaluarea proceselor de impact, de deformare tehnologică, comportării solurilor, lemnului și mai recent a compozitelor, supuse la sarcini limită [14]. Spre deosebire de relația lui Hooke care presupune o relație de proporționalitate directă între tensiune și deformație, în domeniul elasto-plastic relația dintre tensiune și deformație este neliniară, de obicei modelată matematic pe baza unor date experimentale și de o formă mai simplă sau mai complexă în funcție de factorii de influență luați în considerare (temperatură, viteză de deformare etc.). Având în vedere multitudinea de materiale, structuri și solicitări, un model general valabil este greu de realizat și nepractic. De aceea, în această lucrare se va evalua comportarea materialului din care sunt realizate bilele cu un model bilinear pentru un solid elastic cu ecrusare liniară, pe baza unor date experimentale raportate în literatură [36], pentru aceeași marcă de oțel, 100Cr6 durificat până la 65 HRC.

Pentru oțeluri dure, așa cum este cazul oțelului pentru bile, și luând în considerare date experimentale se poate considera limita de curgere identică.

O ipoteză este foarte importantă atunci când se vorbește despre contactul elasto-plastic și anume că proprietățile elastice sunt independente de comportarea plastică, ceea ce presupune cumularea efectului elastic cu cel plastic de forma:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (3.1)$$

în care ε^e reprezintă deformația elastică, iar ε^p reprezintă deformația plastică.

Totodată trebuie să ținem cont și de faptul că modulul de elasticitate va rămâne constant.

Problema contactului elasto-plastic se poate descompune într-o problemă elastică peste care se suprapune o problemă plastică (reziduală).

Când solicitarea aplicată determină tensiuni care depășesc limita de proporționalitate sau de curgere, în anumite zone ale corpurilor în contact, apare o stare de tensiuni pentru care tensiunea echivalentă depășește valoarea limită de elasticitate a materialului, rezultând :

- apariția unui domeniu cu deformații plastice, evident remanente,
- amprenta plastică crește conformabilitatea contactului,
- modificarea geometriei contactului duce la modificarea distribuției de tensiuni pe suprafața contactului și, implicit în volumul corpului din jurul acestuia.

3.2. Modele și simulări pentru contactul sferă-sferă sau sferă-plan

Studiile existente [87] au arătat că, în comparație cu cea din contactul elastic, soluția de contact din contactul elasto-plastic are două caracteristici principale: tensiunea maximă de contact a fost mai mică și raza de contact a fost mai mare.

Hardy [38] a presupus că, atunci când a avut loc o deformare plastică în zona de contact, tensiunea maximă de contact a avut tendința de a fi constantă. Aceasta implică existența unei valori

limită a tensiunii maxime de contact în contactul elasto-plastic, care este proporțională cu limita de curgere a materialelor.

În plus, Thornton [80] a elaborat metodele adoptate de Johnson [48] în studierea impactului dintre o sferă și un plan, și a stabilit un model segmentat de distribuție a tensiunilor de contact.

Un exemplu de contact elasto-plastic dintre două sfere este dat pe baza modelului lui Zhao [89], în domeniul elasto-plastic, iar influențele parametrilor materialului, razele de contact și sarcinile exterioare normale asupra preciziei metodei propuse sunt discutate prin compararea diferențelor dintre rezultatele numerice prin metoda elementelor finite și cele obținute prin metoda propusă, care poate calcula cu precizie tensiunea maximă de contact și raza de contact în contactul elasto-plastic, iar erorile relative, atât ale tensiunii maxime de contact, cât și ale razei de contact, se încadrează în $\pm 5\%$ [89].

Starea de tensiune echivalentă von Mises reprezintă, în cazul materialului analizat, trecerea din domeniul elastic în domeniul plastic, domenii care au proprietăți mecanice diferite și este dată de formula:

$$\sigma_{ech}^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2)] \quad (3.2)$$

în care σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} sunt tensiuni principale, iar σ_{12} , σ_{23} , σ_{31} reprezintă tensiunile de forfecare.

3.3. Modelul propus

Modelul prezentat de autor este un model simplificat al tribotesterului cu 4 bile. Simplificarea constă din faptul că modelul este alcătuit doar din două bile, dar poziția bilelor este poziția reală de pe tribotester, sarcina fiind aplicată tot pe direcția verticală și dezaxat față de cea de-a doua bilă. Echivalarea sarcinii pe model se face prin deplasarea imprimată bilei superioare (rotitoare), o deplasare identică cu cea obținută din testele de laborator.

Deplasarea pe verticală se calculează astfel:

- se determină poziția contactului dintre bila superioară și cea inferioară,
- se calculează deplasarea dintre cele două bile pe direcția centrelor,
- se calculează proiecția deplasării pe axa verticală; deplasarea pe linia centrelor celor două sfere este compusă din înălțimea calotei corespunzătoare mediei urmei de uzură (WSD), ca diametru al calotei, la care se adaugă adâncimea urmei de uzură determinată cu ajutorul profilelor 2D, măsurate perpendicular pe direcția de alunecare.

Modelul este rulat în Ansys (Explicit Dynamics) și în simulare există două etape:

1. etapa de încărcare a celor două bile în condiții statice,
2. efectuarea unei rotații sau a unei părți de rotație, astfel încât urma rezultată în timpul frecării să nu se suprapună peste amprenta inițială dintre sfere.

Ipotezele simplificatoare pentru acest model sunt:

- regim izoterm, pentru că din măsurătorile temperaturii în baia de ulei, la sfârșitul testelor, a rezultat faptul că temperatura nu a depășit $90\text{ }^\circ\text{C}$, ceea ce înseamnă că proprietățile bilelor din oțel

durificat nu sunt afectate (oțelul de rulmenți are o temperatură de revenire joasă de aproximativ 300 °C, până la această temperatură structura și proprietățile oțelului pot fi considerate neinfluențate termic).

- coeficient de frecare specific lubrifierii limită (COF=0,08...0,2)
- modelare fără lubrifiere, multe dintre teste, prin valorile coeficientului de frecare măsurat, denotă existența unui regim mixt și deci o mai mică influență a unei pelicule parțiale de fluid.
- corpuri perfect netede, acest lucru putând fi acceptat în studiul stării de tensiuni și deformații, valori foarte mici ale parametrilor de rugozitate reies din studiul profilometric (vezi capitolul 6).
- uzura nu este luată în considerare, aceasta putând influența rezultatele simulării, dar pentru evaluarea stării de tensiuni și deformații, în regim sever, se poate neglija uzura în primă fază; modelul poate fi dezvoltat ulterior prin luarea în considerare a uzurii. Studiul profilometric 2D în regim sever ne arată faptul că uzura abrazivă este mai observabilă la sarcini mici, iar deformația plastică fără o uzură abrazivă, foarte evidentă, este observabilă la sarcini mari (850N, 900 N)
- model elasto-plastic pentru oțelul din care sunt făcute bilele. Din studierea literaturii referitoare la teste și modele pentru oțeluri durificate, s-a optat pentru modelarea bilinar-izotropică cu durificare, pe baza datelor experimentale oferite de către unii cercetători [36].

În Fig. 3.1 (a) este reprezentată curba tensiune-deformație pentru oțelul AISI 52100 folosit de Guo [36] pentru modelul său, iar în Fig. 3.1 (b) este prezentată curba tensiune-deformație pentru modelul de material folosit în simulare de către autorul tezei.

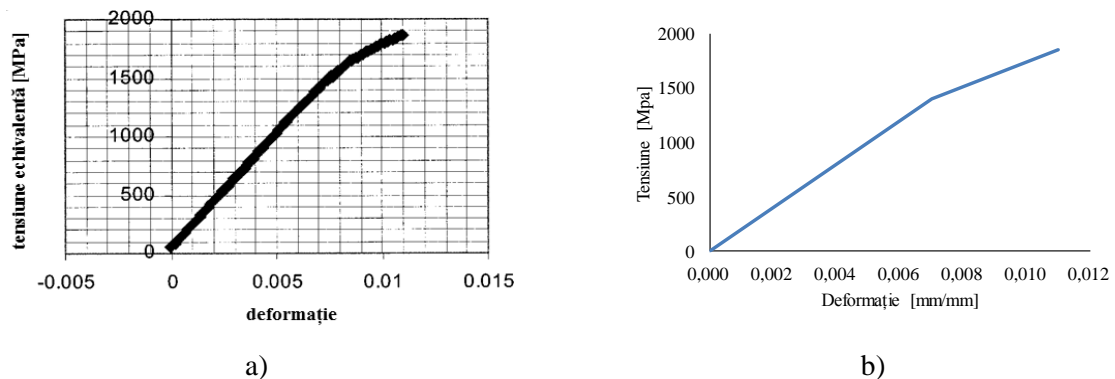


Fig. 3.1. a) Curba tensiune- deformație pentru oțelul AISI 52100 [36]

b) curba tensiune-deformație pentru modelul de material ales de către autorul tezei

Autorul tezei a luat în considerare deformații plastice de ordinul $3 \times 10^{-3} \dots 4 \times 10^{-3}$ (mm/mm) pe model deoarece pe graficul tensiune- deformație, deformația plastică se consideră că începe de la aproximativ 5×10^{-3} (mm/mm) pe curba materialului AISI 52100 .

Simularea are ca variabile coeficientul de frecare și deplasarea pe direcție verticală a bilei rotitoare, echivalentă forței înregistrată în testul real (vezi Fig. 3.4-Fig. 3.6. și Tabelul 3.3.).

Cele două sfere aflate în contact sunt reprezentate în Fig. 3.2 (a). Figurile 3.2 (b) și (c) prezintă detalii ale discretizării. Autorul a optat pentru o discretizare fină a zonei de contact de pe bila nerotitoare și a unui sector de sferă corespunzător drumului de alunecare de pe bila rotitoare. Numărul

de noduri este de 29390, iar numărul de elemente este de 155259. Raportul de tranziție între elemente este de 0,272, în timp ce rata de creștere a elementelor este în valoare de 1,2. În Tabelul 3.1 este dat modelul de material propus de către autor, cu proprietățile acestuia, iar în Tabelul 3.2 sunt date valorile punctelor caracteristice pe curba tensiune- deformație, pentru oțelul bilelor.

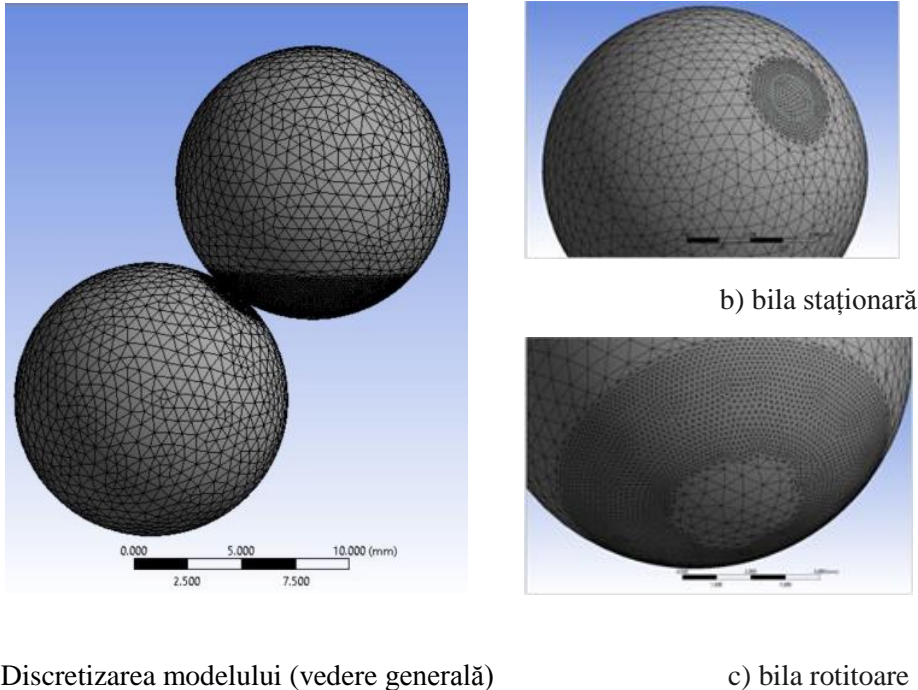


Fig. 3.2. Detalii ale discretizării zonelor de contact

Tabelul 3.1. Proprietăți de material (pentru modelul propus de autor)

Proprietatea	Valoarea
Densitatea [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7850
Modulul lui Young [MPa]	$2\cdot 10^5$
Coeficientul Poisson	0,3
Modulul în volum [MPa]	$1,6667\cdot 10^5$
Modulul de forfecare [MPa]	$0,76923\cdot 10^5$

Tabelul 3.2. Punctele caracteristice pe curba tensiune deformație, pentru oțelul bilelor

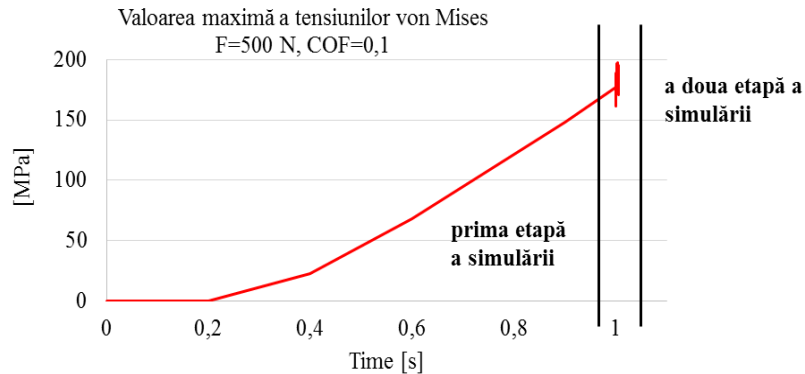
Tensiune [MPa]	Deformație [mm/mm]
1	0
1400	$7\cdot 10^{-3}$
1850	$1,1\cdot 10^{-2}$

Etapele simulării sunt:

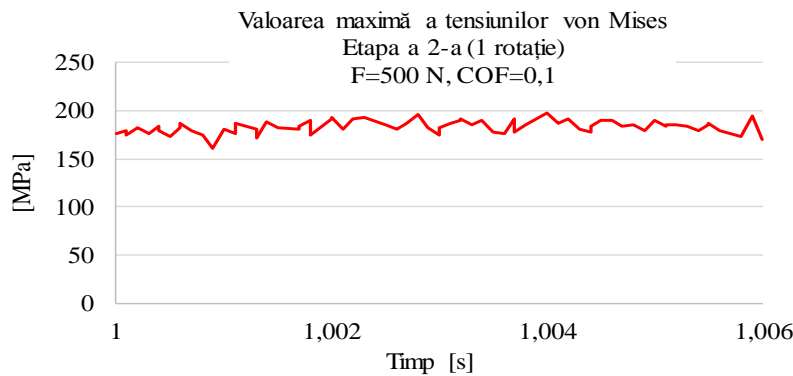
- etapa 1 în care are loc o încărcare în pantă a celor două bile până când deplasarea pe direcția z de pe model este apropiată suficient de deplasarea reală a sistemului cu patru bile,
- etapa 2 care constă în efectuarea unei rotații complete (360°) sau incomplete (300°) în funcție

de sarcină.

În Fig 3.3 este prezentată evoluția tensiunilor echivalente (von Mises), unde se pot vedea foarte bine cele două etape ale simulării, (a) încărcare statică + rotație, (b) rotație.



a) Întregul interval al simulării



b) A doua etapă a simulării

Fig. 3.3. Identificarea etapelor simulării, aici fiind reprezentată valoarea tensiunii maxime pentru $F=500\text{ N}$, $\text{COF}=0,1$ (echivalent cu $z=0,0065\text{ mm}$)

Simularea se realizează în două etape. O primă etapă constă în încărcarea statică a bilelor când forța este aplicată de la $F=500\text{ N}$ la $F=900\text{ N}$, crescător, până la valoarea considerată echivalentă cu deplasarea z a bilelor pe direcția verticală. După încheierea acestei etape urmează cea de-a doua, care constă în începerea rotirii bilei superioare. Aceasta execută o rotație completă în 1,006 secunde (corespunzătoare vitezei de alunecare din teste, $0,53\text{ m/s}$ sau 1400 rot/min).

În triunghiul echilateral $O_1O_2O_3$, înălțimea este dată de formula

$$H = \frac{O_1O_2\sqrt{3}}{2} = \frac{2r\sqrt{3}}{2} = 10,985\text{ mm} \quad (3.3)$$

în care $O_1O_2=2r$.

$$\text{In } \Delta MPO_4, \angle MPO_4 = \angle NO_1O_4 = \alpha \text{ și } \beta = 180^\circ - (90^\circ + \alpha), \quad (3.4)$$

în care

$$\alpha = \arccos \frac{1,15r}{2r} = \arccos 0,575 = 54,90^\circ \quad (3.5)$$

r este raza sferei, $r=6,35$ mm. Rezultă $\beta=35,10^\circ$

Deplasarea pe verticală a bilei rotitoare, z se calculează folosind formula

$$z = 2\delta \sin \alpha \tag{3.6}$$

Deplasarea z devine:

$$z = 2\delta \sin 54,90^\circ = 1,636 \delta \tag{3.7}$$

$$\delta = \frac{z}{2 \sin \alpha} \tag{3.8}$$

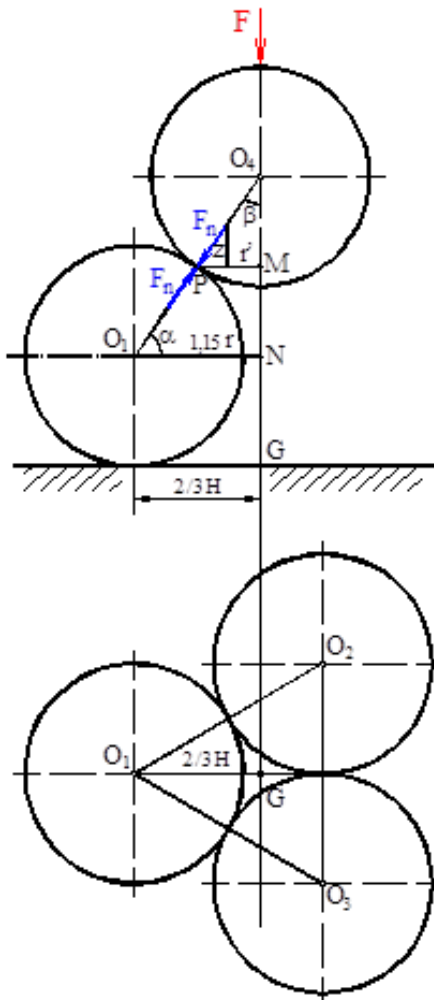


Fig. 3.4. Geometria modelului

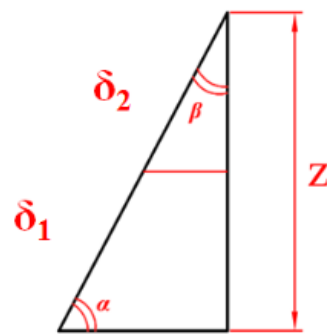


Fig. 3.5. Componentele deplasării pe verticală

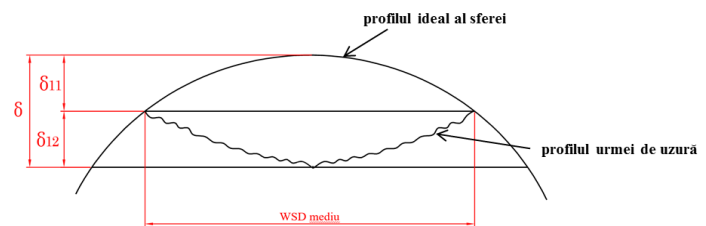


Fig. 3.6. Adâncimea urmei de uzură măsurată pe profilul 2D, obținut perpendicular pe direcția de alunecare

Din Tabelul 3.3 (valori măsurate pt z), avem δ_{11} ca fiind adâncimea urmei de uzură măsurată pe profilul 2D al bilei, δ_{12} înălțimea calotei sferice, care se calculează cu relația:

$$A = \frac{\pi(WSD)^2}{4} = 2\pi r, \tag{3.9}$$

de unde va rezulta că:

$$\delta = \frac{\pi(\text{WSD})^2}{8\pi r} = \frac{(\text{WSD})^2}{8r} \quad (3.10)$$

Centrele celor trei bile nerotitoare formează un triunghi echilateral, $\Delta O_1O_2O_3$. Centrul de greutate al triunghiului echilateral, notat cu G, se află la intersecția înălțimilor, aflându-se totodată la $2/3$ de vârf și la $1/3$ de bază. Cu H s-a notat înălțimea triunghiului echilateral, iar distanța O_1G va fi:

$$O_1G = \frac{2}{3}H = 1,15r \quad (3.11)$$

Deplasarea bilelor pe direcția centrelor lor se consideră ca fiind o sumă $\delta = \delta_{11} + \delta_{12}$ în care δ_{11} și δ_{12} sunt modificările pe direcție radială a profilelor simplificate ale bilelor. La randul ei, fiecare deplasare este formată din două componente.

- adâncimea urmei de uzură măsurată pe profilul 2D obținut perpendicular pe direcția de alunecare (Fig. 3.8),

- înălțimea calotei sferice care are la bază diametrul mediu al WSD, așa cum a fost măsurat și calculat pentru forța luată în considerare.

Cazurile simulate au ca variabilă COF și deplasarea pe verticală a sferei rotitoare, care a fost introdusă ca valoare după calcularea deplasării pe verticală ținând cont de deformarea reală a bilelor

$$\delta = \delta_{11} + \delta_{12} \quad (3.12)$$

unde δ_{11} și δ_{12} reprezintă adâncimile urmelor de uzură de pe cele două bile pe direcția forței normale, δ_{11} reprezentând adâncimea urmei de uzură pe direcția contactului de pe bila 1, iar δ_{12} fiind adâncimea urmei de uzură de pe bila rotitoare, bila 2; urma de uzură de pe bila care se rotește este o urmă de formă circulară.

Se va calcula deplasarea bilei rotitoare ca fiind proiecția pe direcția verticală a deplasării δ și unghiul α , dintre direcția verticală și direcția de aplicare a forței pe cele două bile.

Pentru că δ_{11} și δ_{12} sunt dificil de măsurat, ele se calculează considerând axa elipsei urmei de uzură, înregistrată pe direcția de alunecare, ca fiind diametrul unei calote sferice de înălțime δ_{11} , respectiv δ_{12} :

$$\delta_{11} = \frac{\pi(\text{WSD})^2}{4} \frac{1}{2\pi R} \quad (3.13)$$

$$\delta_{12} = \frac{\pi(\text{WSW})^2}{4} \frac{1}{2\pi R} \quad (3.14)$$

unde, WSD este diametrul urmei de uzură, iar WSW este lățimea urmei de uzură de pe bila rotitoare.

Geometria este aceeași, dar se modifică deplasarea bilelor una spre cealaltă și coeficientul de frecare. Pentru același δ , se rulează trei cazuri, fiecare cu alt coeficient de frecare.

Tabelul 3.3. Valori măsurate și adoptate pentru z

Forța	WSD	δ_{11} (adâncimea profilului ca linie mediană)	δ_{12} (înălțimea calotei cu baza WSD)	δ_1	$2*\delta_1$	z	valoare aplicată în model
[N]	[μm]						
500	354	1,5	2,466	3,96685	7,933701	6,48	6,5
600	426	2,2	3,572	5,772362	11,54472	9,44	9,5
700	687	12	9,290	21,29073	42,58146	34,83	35
850	2582	220	131,234	351,2347	702,4694	574,62	575
900	2692	230	142,654	372,6548	745,3096	609,66	610

În Tabelul 3.3 au fost introduse diametrele urmelor de uzură (WSD), adâncimea profilului (δ_{11}), obținute din măsuratori și parametri geometrici calculați, astfel încât, deplasarea z să poată fi aplicată în model. z reprezintă valorile calculate ale deplasării, în ultima coloană a tabelului fiind valorile aplicate în model, approximate la prima zecimală.

Dacă se reprezintă grafic, în Fig. 3.7, se obține curba pentru deplasarea z și se observă că până la 700 N, valoarea deplasării crește puțin, de la 750 N deplasarea are valori mai mari, saltul foarte mare realizându-se între 800 N și 850 N.

În Fig. 3.8 sunt date profilele 2D de pe bila fixă ale diametrelor urmei de uzură perpendiculare pe direcția de alunecare, pentru forțe diferite, de la cea mai mică forță analizată, F=500 N, până la forța cea mai mare analizată, F=900 N [92].

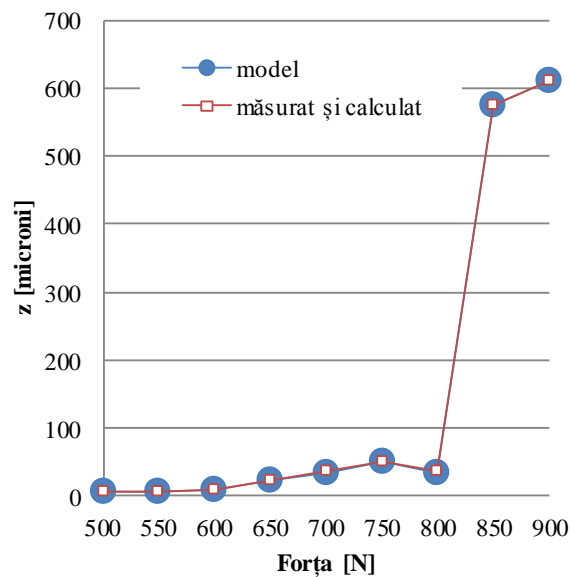


Fig. 3.7. Valoarea deplasării pe verticală a bilelor, corespunzătoare forței aplicată pe direcție verticală

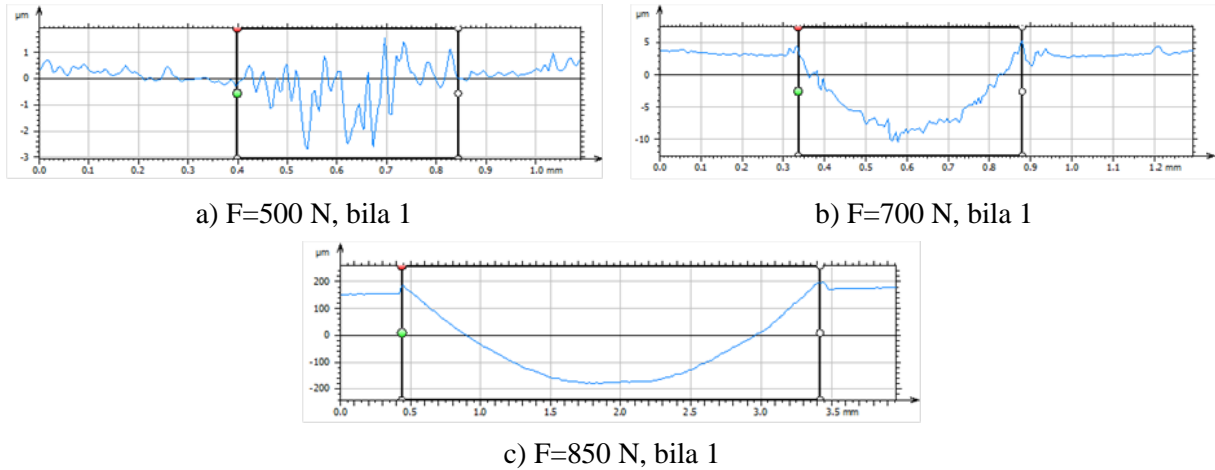


Fig. 3.8. Profile tipice ale urmei de uzură pe un profil 2D, măsurat perpendicular pe direcția de alunecare

Se observă că pentru $F=500\text{ N}$ și $F=600\text{ N}$ forma profilului indică o adâncime foarte mică a urmei de uzură, dacă luăm în considerare curba de referință, profilul relevând mai degrabă uzură abrazivă superficială. Pentru forța $F=700\text{ N}$ până la $F=900\text{ N}$ se observă o adâncime mult mai mare a urmei, fără o profilare excesivă a urmei, ceea ce ar sugera o deformație plastică puternică.

3.4 Rezultatele simulării

3.4.1. Influența valorii COF asupra stării de tensiuni și de deformații

Simularea alunecării între cele două bile s-a făcut pentru următoarele cazuri: un caz fără frecare ($\text{COF}=0$) și două cazuri cu frecare ($\text{COF}=0,08$ and $\text{COF}=0,1$). Pentru fiecare caz în parte se analizează tensiunea echivalentă maximă, la fiecare moment și distribuția de tensiuni și deformații și se discută valoarea deformațiilor plastice în funcție de valorile obținute pentru urma de uzură.

Figura 3.9 prezintă evoluția deformației elastice maxime în timp pentru cel două etape ale simulării:

- a) pentru întreaga durată a simulării,
- b) pentru etapa cu mișcare relativă între bile.

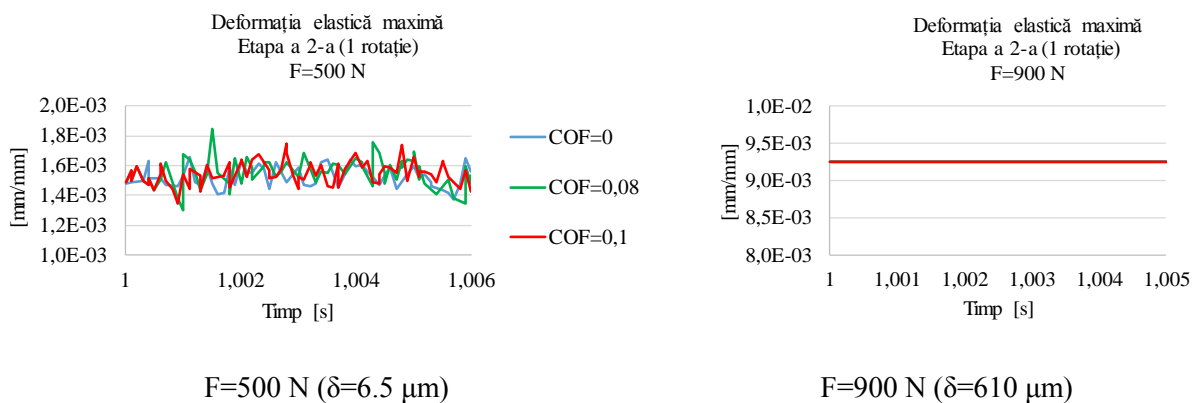


Fig. 3.9. Evoluția deformației elastice maxime, pe bila fixă, în timp, pentru $F=500\text{ N}$ și $F=900\text{ N}$

Conform teoriei prezentate în [27], deformația totală poate fi considerată suma algebrică a deformației elastice și deformației plastice. De aceea în continuare vor fi analizate componentele deformației totale pentru etapa a doua a simulării, alunecarea celor două bile.

La $COF=0$ se poate observa că deformația elastică maximă rămâne constantă, ceea ce înseamnă că materialul și-a epuizat domeniul de elasticitate liniară și a intrat în domeniul plastic. Partea elastică are o comportare similară indiferent de valoarea coeficientului de frecare.

Bila rotitoare împinge materialul creând un prag de material în fața bilei, din ce în ce mai mare, peste care trebuie să sară. Acest proces este specific numai domeniului elastic al materialului.

Pentru $F=900$ N se observă că valorile deformației elastice maxime sunt constante sugerând că deformația totală maximă va avea o componentă plastică, acest lucru fiind logic pe baza suprapunerii efectelor elastice și plastice, așa cum explică și Frunză [27] în lucrarea sa.

Valorile deformației plastice maxime sunt date în Fig. 3.10. La forța $F=500$ N valoarea deformației plastice maxime la sfârșitul rotației se ordonează proporțional ca și coeficientul de frecare. Deci, valoarea cea mai mare după o rotație pe bila nerotitoare este pentru coeficientul de frecare egal cu 0,1.

Este posibil ca din cauza lipsei frecării, materialul din fața bilei rotitoare de pe bila nerotitoare să fie mai puternic deformat.

Deja, la $F=500$ N, deformația plastică maximă depășește valoarea de $1/1000$; sarcina de 500 N nu este recomandată pentru funcționarea sistemului în regim mixt cu coeficient de frecare între 0 și 0,1. La coeficient de frecare nenul, deformația plastică maximă variază mult mai puțin decât în cazul fără frecare.

Deformația plastică este indusă la sarcini mici de mișcare, $1/1000$ fiind deformația plastică acceptată la rulmenți. Introducerea coeficientului de frecare uniformizează deformația plastică.

Analiza rezultatelor simulării se va face prin compararea valorilor deformațiilor plastice cu cele măsurate. Se observă că modelarea face posibilă măsurarea unor valori foarte mici ale deformației plastice. Pe orice imagine cu starea de deformație, valorile cuprinse între $3 \times 10^{-3} \dots 4 \times 10^{-3}$ mm/mm vor fi luate în considerare pentru măsurarea urmei de deformație pe model.

Coeficientul de frecare mai mare determină o creștere a deformațiilor plastice.

Conform definiției, pentru deformații plastice admise la bilele de rulment, valorile deformației plastice deja depășesc 1 la mie, deci 500 N nu se află în intervalul de sarcini pentru regim normal, reprezentând deja un regim sever. Deformațiile apar deja la prima rotație, când sarcina este aplicată în repaos, înainte de rotație, așa cum se întâmplă și experimental. Ușoarele oscilații ale coeficientului de frecare obținute experimental pot fi explicate prin micile variații ale deformației elastice și plastice.

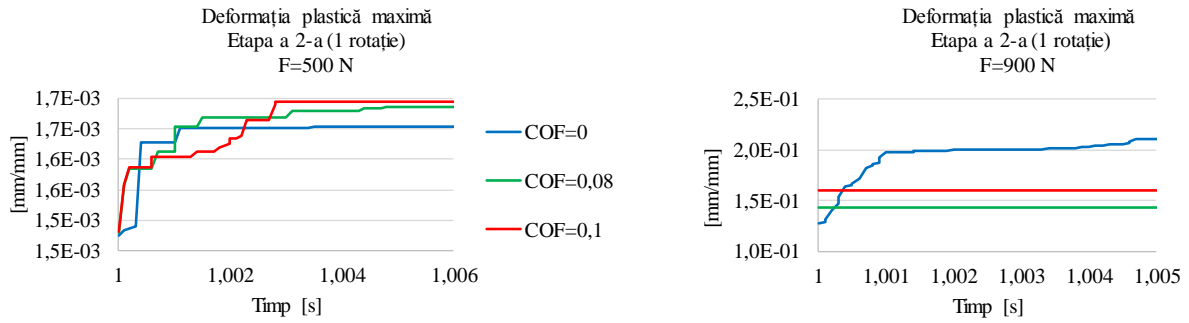


Fig. 3.10. Evoluția deformației plastice maxime, pe bila fixă, în timp, pentru etapa a doua a simulării

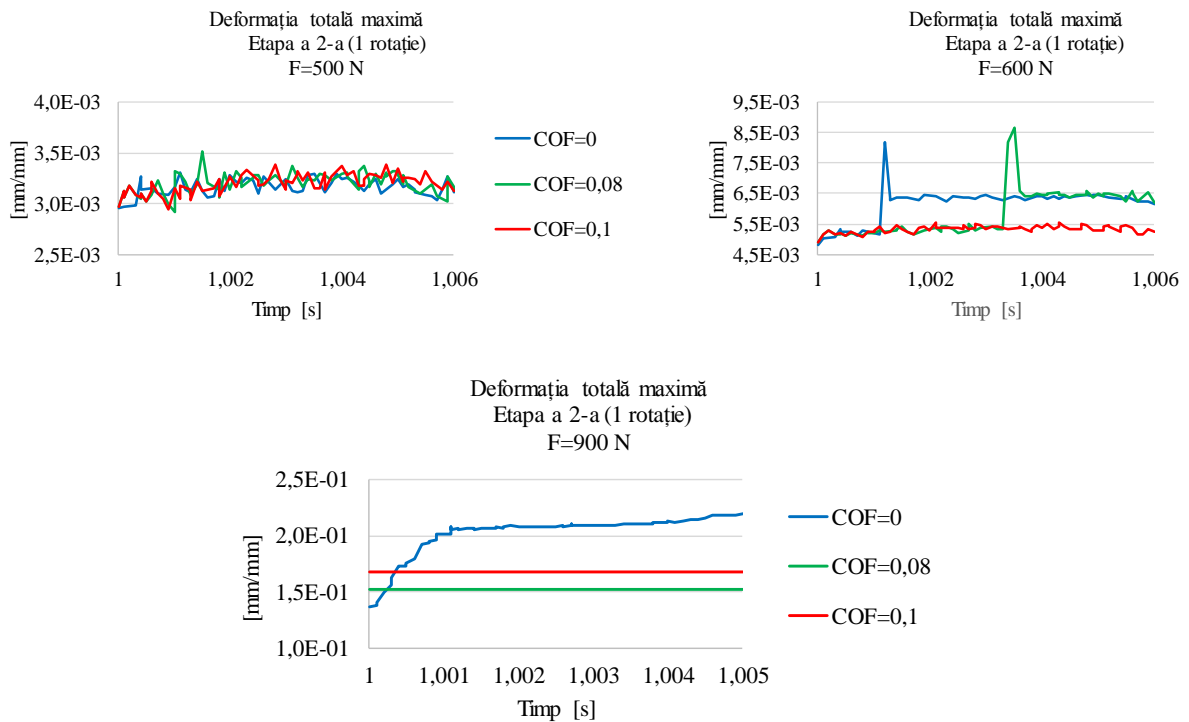


Fig. 3.11. Evoluția deformației totale maxime, în timp, pe bila fixă, pentru etapa a doua a simulării

Deformația totală maximă este prezentată în Fig. 3.11 și se bazează pe principiul suprapunerii efectelor, adunându-se algebric deformația elastică și deformația plastică. În primă fază materialul își epuizează deformația elastică, apoi intră în domeniul deformației plastice $\epsilon_{total} = \epsilon_{elastic} + \epsilon_{plastic}$

Analiza valorilor maxime ale tensiunii echivalente (von Mises) se observă în Fig. 3.12.

La 500 N intervalul de variație a tensiunilor von Mises este cam același indiferent de valoarea coeficientului de frecare. Totuși, cele mai mari valori s-au obținut pentru coeficientul de frecare intermediar și anume 0,08. La 600 N pentru valorile 0 și 0,08 ale coeficientului de frecare apar maxime; când bila a făcut amprenta și trebuie să se rotească apare un maxim. S-au observat două vârfuri de tensiuni, cam de aceeași valoare (aproximativ 500 MPa) pentru valorile de 0 și 0,08 ale COF. Acestea ar putea fi explicate prin faptul că bila superioară deja a amprentat bila inferioară, iar la rotație trebuie să sară peste marginile amprenteii.

Valorile maxime ale tensiunilor echivalente pentru 500 N și 600 N nu depășesc limita de curgere. Vârfulurile de tensiuni echivalente maxime sunt corespunzătoare vârfurilor de deformații totale maxime. Nici tensiunea nu presupune o amprentă substanțială a urmei de uzură.

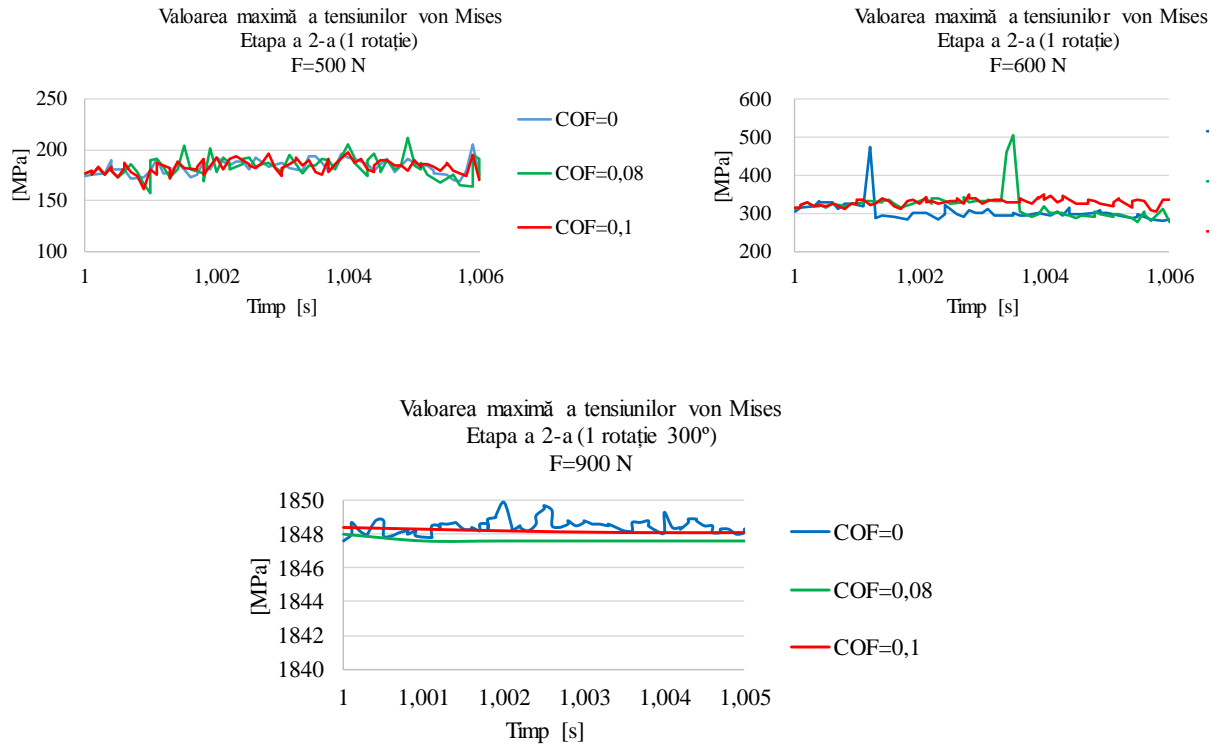


Fig. 3.12. Evoluția tensiunilor maxime echivalente, în timp, pe bila fixă, pentru etapa a doua a simulării

La 900 N tensiunea este constantă deoarece se mărește urma de uzură. La valoarea coeficientului de frecare egală cu 0, bilele mai saltă neavând tensiuni tangențiale. Pentru valori mai mari ale coeficientului de frecare, se observă o variație mai mică a tensiunilor. Variația valorilor maxime ale tensiunilor echivalente pentru cazul fără frecare este de 0,119% din valoarea minimă înregistrată pentru cazul fără frecare:

$$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\min}} \cdot 100\% \quad (3.15)$$

În Tabelul 3.4 au fost introduse valorile calculate ale deplasării, diametrele medii ale urmelor de uzură măsurate la microscop, dar și pe model pentru toate forțele aplicate.

În Tabelul 3.5 sunt date valorile maxime și minime ale tensiunilor echivalente (von Mises) și variația acestora pentru etapele simulate, având ca variabile forța și coeficientul de frecare.

Procentul variației tensiunilor maxime echivalente reprezintă raportul dintre variația tensiunilor echivalente și tensiunea maximă echivalentă și se calculează cu formula:

$$\Delta\sigma_{\%} = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{\max}} \cdot 100 \quad (3.16)$$

în care $\Delta\sigma$ reprezintă diferența dintre valoarea maximă a tensiunii echivalente (σ_{\max}) și valoarea minimă obținută pentru tensiunea echivalentă (σ_{\min}).

Tabelul 3.4. Diametrele urmei de uzură măsurate, valoarea deplasării și variația mediei diametrelor urmelor de uzură

Cazul	Forța pe sistemul real [N]	z [mm]	Măsurate (medie pe un test) [mm]	Măsurate pe model [mm]	Variația mediei [%] $(WSD_{\text{real}} - WSD_{\text{model}}) \cdot 100 / WSD_{\text{real}}$
1	500	0,0065	0,354 (0,298...0,389)	0,4 (0,390...0,410)	-13
2	600	0,0095	0,426 (0,397...0,423)	0,440 (0,420...0,455)	-3
3	700	0,035	0,687 (0,63...0,744)	0,700 (0,680...0,720)	-2
4	850	0,575	2,582 (2,5...2,65)	2,750 (2,6...2,8)	-7
5	900	0,61	2,692 (2,569...2,883)	2,800 (2,7...2,9)	-4

Tabelul 3.5. Variația tensiunilor maxime echivalente, având ca variabile forța și coeficientul de frecare

Forța [N]	COF	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	$\Delta\sigma\%$ [%]
500	0	205	170	35	17,07
	0,08	210	158	52	24,76
	0,1	197	161	36	18,27
900	0	1850	1833	17	0,91
	0,08	1848	1833	15	0,81
	0,1	1848	1830	18	0,97

3.4.2. Analiza tensiunilor de forfecare

Tensiunile de forfecare pot provoca deformarea unui material prin alunecare, de-a lungul unui plan paralel cu tensiunea impusă. La contactele cu frecare trebuie să se ia în considerare forțele tangențiale exterioare. Aceste forțe modifică starea de tensiuni de forfecare.

În Fig. 3.13 sunt prezentate tensiunile de forfecare aferente planurilor de referință după care se face forfecarea, τ_{xy} , τ_{yz} și τ_{xz} , notația corespunzând sistemului de coordonate ales, același pentru toate cazurile rulate. În prima coloană se regăsesc imagini cu tensiunile de forfecare și valorile acestora pentru cazul simulat fără frecare, iar în cea de-a doua coloană tensiunile de forfecare pentru cazul cu frecare, valoarea coeficientului de frecare fiind de 0,1.

După cum se observă din Fig. 3.13, valorile tensiunilor tangențiale, atât pentru cazul în care nu

există frecare, cât și pentru cel cu frecare, pentru planurile de referință după care se face forfecarea și anume τ_{xy} și τ_{yz} sunt aproape identice. În schimb, pentru planul de referință xz , valorile tensiunilor tangențiale sunt mai mari pentru simularea cu frecare decât în cazul simulării, unde coeficientul de frecare este 0.

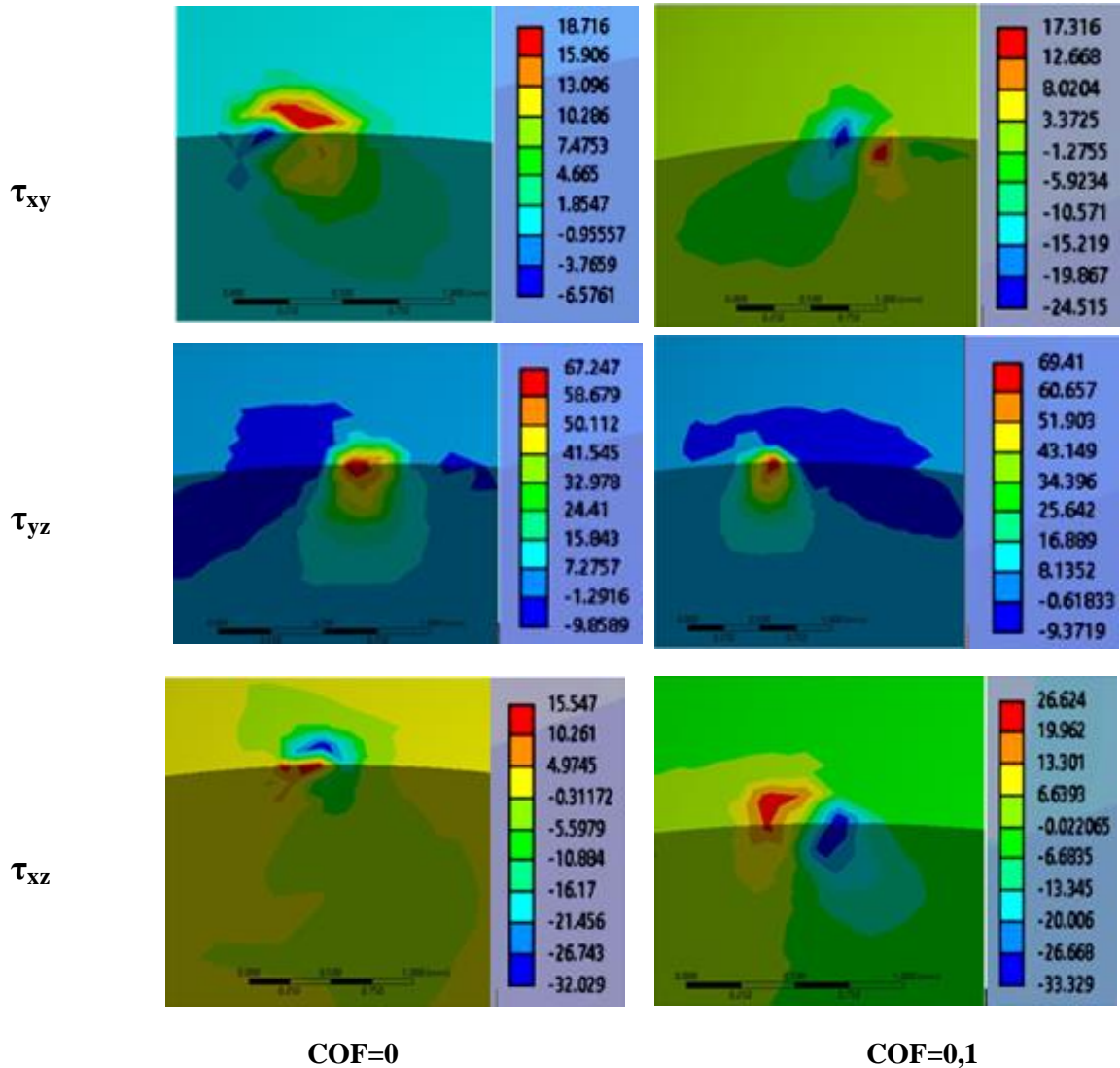


Fig. 3.13. Tensiuni de forfecare, F=500 N

Analizând Fig. 3.14, se observă că valorile tensiunilor de forfecare, pentru forța F=900 N și coeficient de frecare nul, sunt mai mari decât tensiunile de forfecare pentru cazul cu frecare, pentru toate tensiunile de forfecare analizate.

Pentru cazul în care nu există frecare τ_{xy} păstrează oarecare simetrie, dar valorile sunt mai mari, $\tau_{xy\max} = 875$ Mpa.

Când se simulează frecarea (COF=constant), distribuția pentru τ_{xy} se modifică, zona de maxim se asimetrizează și apare concentrația în jumătatea din față a contactului și chiar în fața acestuia. Pentru F=900 N, diferența între valorile maxime ale tensiunilor de forfecare pentru cazurile extreme simulate (COF=0 și COF=0,1) este:

$$\Delta\tau_{xy} = \frac{\tau_{xy}(\text{COF}=0) - \tau_{xy}(\text{COF}=0.1)}{\tau_{xy}(\text{COF}=0)} = \frac{875 - 681}{875} \cdot 100 = 22\% \quad (3.17)$$

față de valoarea la COF=0.

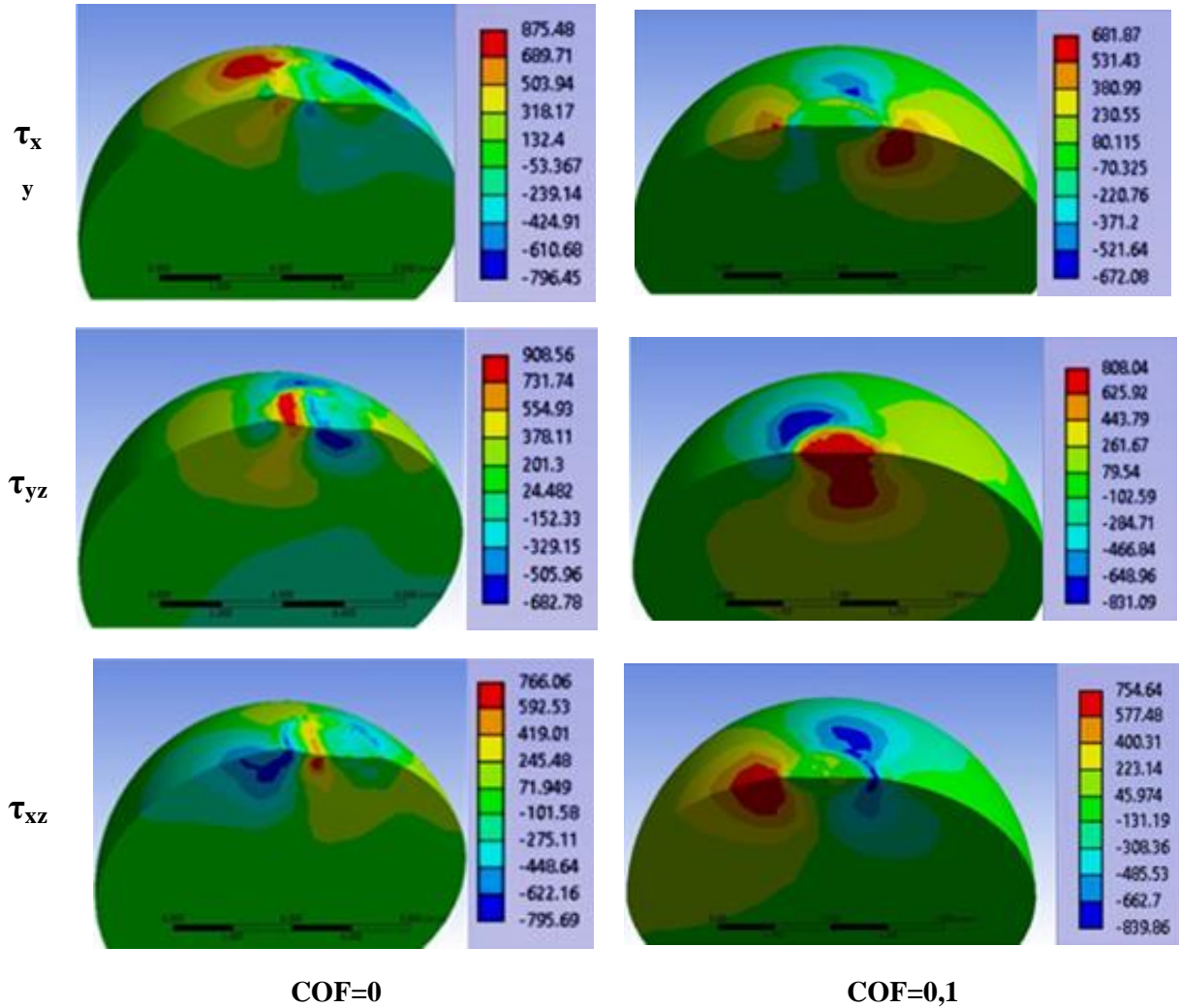


Fig. 3.14. Tensiuni de forfecare F=900 N

τ_{xz} are valorile cele mai mici, comparativ cu celelalte tensiuni de forfecare, dar cu variația cea mai mică

$$\Delta\tau_{xz} = \frac{\tau_{xz}(\text{COF}=0) - \tau_{xz}(\text{COF}=0.1)}{\tau_{xz}(\text{COF}=0)} \cdot 100 = \frac{766 - 754}{766} \cdot 100 = 1,56\% \quad (3.18)$$

Zona distribuției de valori maxime apare în fața contactului, chiar puțin în afara acestuia, ceea ce ar explica puternica deformare plastică din fața contactului.

τ_{yz} are valori mari pentru cazul fără frecare, $\tau_{yz}(\text{COF}=0)=908$ MPa față de $\tau_{yz}(\text{COF}=0.1)=808$ MPa.

Volumul cu distribuție mare pentru τ_{yz} este dat în formula:

$$\Delta\tau_{yz} = \frac{\tau_{yz}(\text{COF}=0) - \tau_{yz}(\text{COF}=0.1)}{\tau_{yz}(\text{COF}=0)} \cdot 100 = \frac{908 - 808}{908} \cdot 100 = 11,01\% \quad (3.19)$$

3.4.3. Influența sarcinii asupra comportării modelului

În Fig. 3.15 sunt date evoluțiile în timp ale valorilor maxime ale tensiunii von Mises. În prima

etapă de încărcare statică a simulării, în intervalul de timp (0-1 secundă), atât pentru cazul fără frecare, cât și pentru cazul cu frecare (coeficient de frecare 0,08 și 0,1) la forțele mai mici, 500 N și 600 N, valorile tensiunilor maxime echivalente variază în același interval de la 0 la 500 MPa. Graficele pentru aceste cazuri sunt foarte asemănătoare, valorile tensiunilor nedepășind valoarea limitei de curgere.

La 700 N, pentru ambele cazuri cu frecare, dar și pentru cazul fără frecare, intervalul de oscilație este cam același, valoarea maximă a tensiunilor echivalente ajungând până la 1500 MPa.

La 850 N și 900 N valoarea maximă a tensiunilor echivalente ajunge până la valoarea de 1850 MPa, graficele suprapunându-se pe întreg intervalul.

Aceeași situație o regăsim și în a doua etapă a simulării, între 1-1,005 secunde, unde regăsim aceleași intervale de oscilație pentru tensiunile maxime echivalente, cu mențiunea că la 600 N apar niște pick-uri, semn că materialul este încă în domeniul elastic.

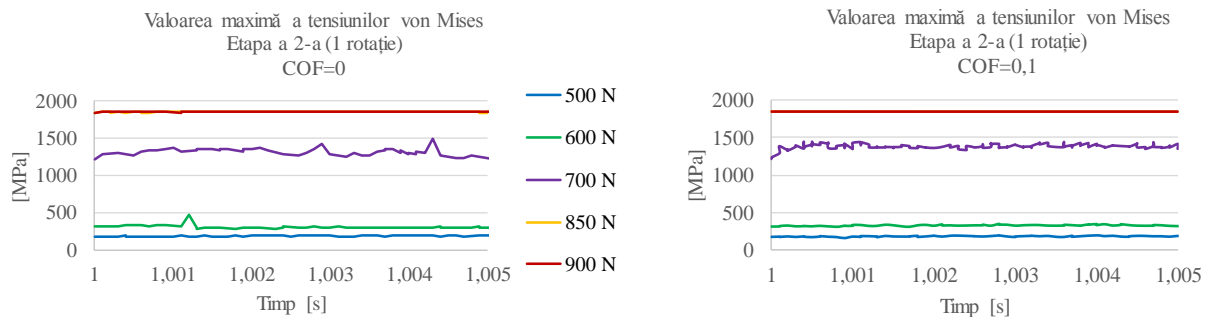


Fig. 3.15. Influența coeficientului de frecare asupra stării de tensiuni maxime echivalente, în etapa a doua a simulării

În Fig. 3.16 este prezentată influența sarcinii asupra stării de deformații elastice.

În etapa a doua de simulare se observă vârfuri de deformație elastică la 600 și 700 N, apărute din modul de deformare al materialului.

La cazurile cu frecare se observă o zdrențuire a graficului valorilor maxime ale deformațiilor elastice pentru $F=600\text{ N}$ și $F=700\text{ N}$.

La $F=850\text{ N}$ și $F=900\text{ N}$ graficele sunt suprapuse perfect unul peste celălalt.

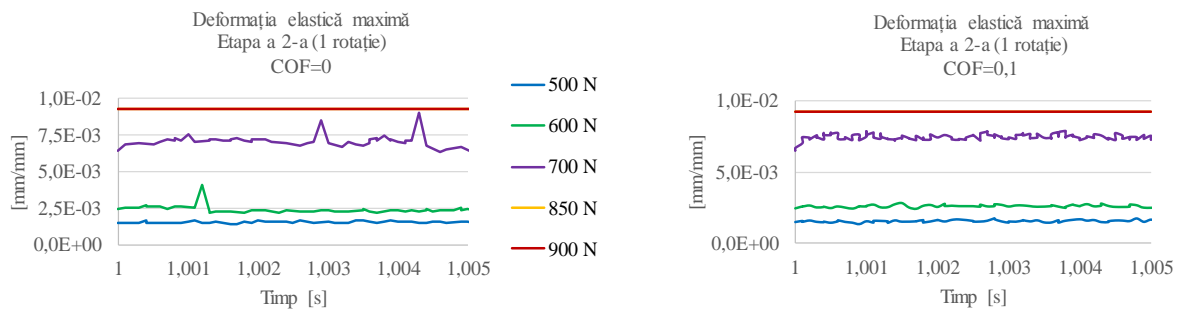


Fig. 3.16. Influența coeficientului de frecare asupra stării de deformații elastice maxime, în etapa a doua a simulării

Figura 3.17 prezintă influența sarcinii asupra deformațiilor plastice maxime. Dacă analizăm forțele de 500 N, 600 N și 700 N se observă o evoluție similară a acestora atât pentru cazul în care nu există frecare, cât și pentru cazul cu frecare pentru ambele etape ale simulării. Totuși, la 700 N se observă valori un pic mai mari ale deformațiilor plastice maxime decât pentru forțele de 500 N și 600 N.

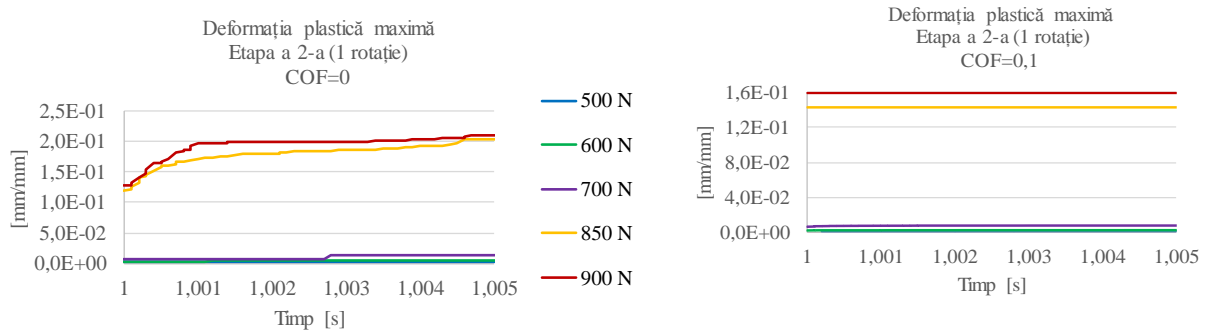


Fig. 3.17. Influența coeficientului de frecare asupra stării de deformații plastice maxime, în etapa a doua a simulării

În schimb, la forțe mari, se observă valori mult mai mari ale deformațiilor plastice, acestea ajungând chiar și la $2,5 \times 10^{-1}$ mm/mm. pentru cazul în care nu există frecare, în prima etapă de simulare. Chiar și în a doua etapă a simulării deformația plastică maximă este mai mare în cazul fără frecare decât în cazul în care avem coeficient de frecare nenul.

Figura 3.18 prezintă modul în care coeficientul de frecare influențează distribuția tensiunilor echivalente. S-au analizat doar cazurile pentru coeficientul de frecare nul și pentru coeficientul de frecare egal cu 0,1 pentru forța $F=500$ N. Valorile tensiunilor echivalente pentru ambele cazuri simulate sunt relativ asemănătoare.

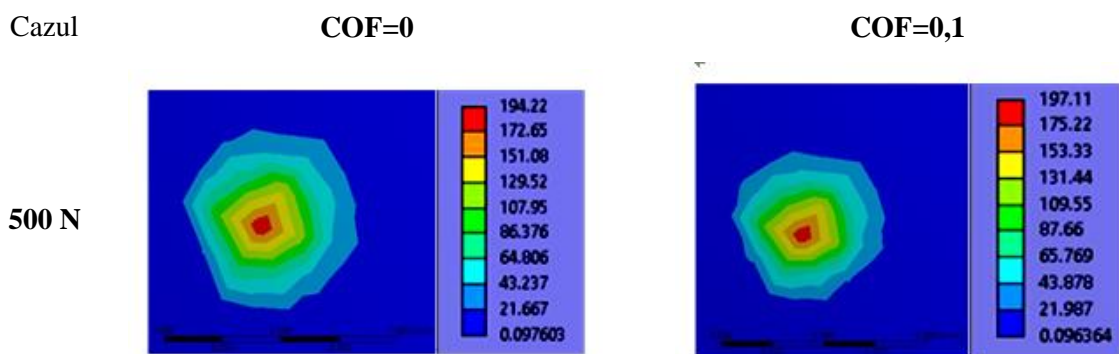


Fig. 3.18. Influența coeficientului de frecare asupra distribuției tensiunilor echivalente (în MPa), $F=500$ N. Bila rotitoare a efectuat un unghi de rotație egal cu 360°

La 700 N valorile tensiunilor echivalente maxime ajung în jur de 1042,7 MPa pentru bila nerotitoare (Fig. 3.19).

În Fig. 3.20 se observă, atât în cazul în care nu există frecare, dar și în cazul cu frecare, la

forța de 900 N, pentru bila staționară, valori ale tensiunilor maxime echivalente de 1843,7 MPa.

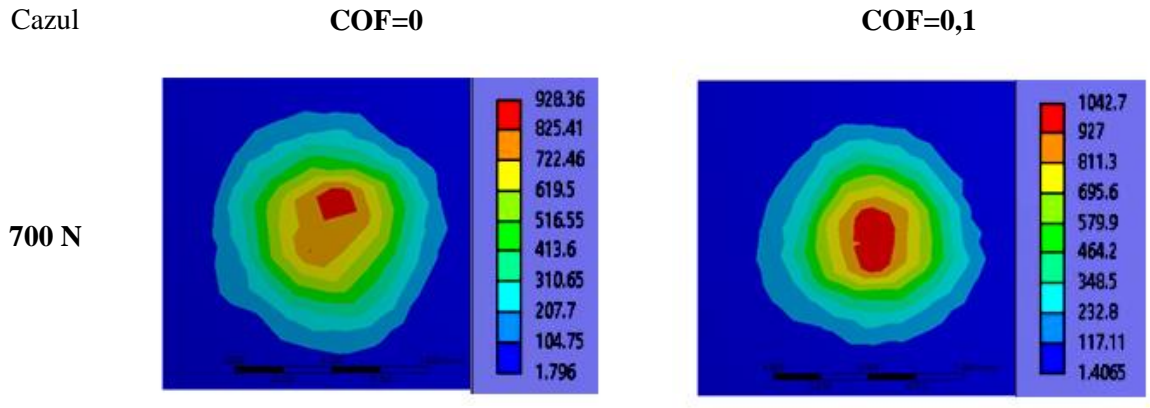


Fig. 3.19 Influența coeficientului de frecare asupra distribuției tensiunilor echivalente (în MPa), $F=700$ N. Bila rotitoare a efectuat un unghi de rotație egal cu 360°

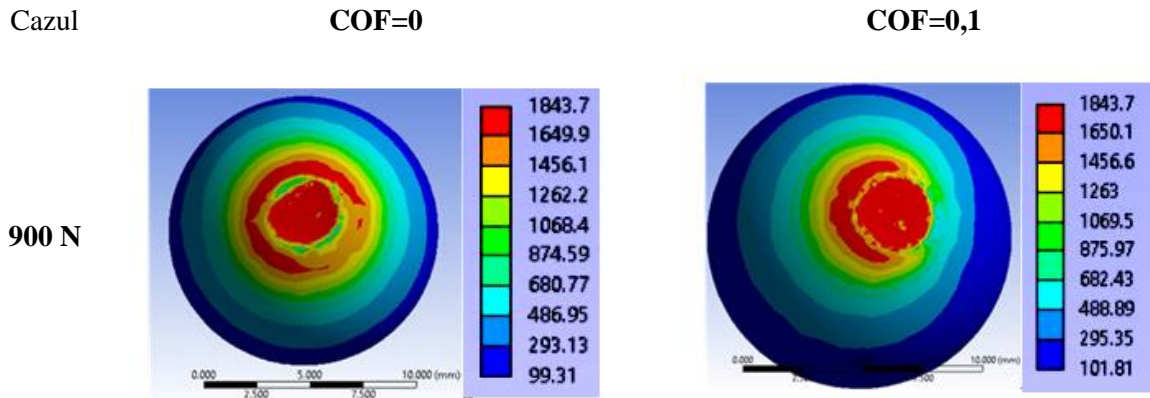


Fig. 3.20. Influența coeficientului de frecare asupra distribuției tensiunilor echivalente (în MPa), $F=900$ N. Bila rotitoare a efectuat un unghi de rotație egal cu 300°

În Fig. 3.21 sunt date urmele de uzură, reconstituite virtual cu softul Mountains SPIP 8.1, pentru bila 1, nerotitoare, a unui set de bile testat în ulei de rapiță neaditivat. Testarea s-a făcut pentru forțe de 500 N, 850 N și 900 N, iar viteza de alunecare a fost de 0,53 m/s. Durata testului a fost de 60 s, iar regimul de testare a fost unul sever.

Urmele de uzură seamănă cu cele determinate pe bilă, în sensul că urmele de pe bila fixă nu sunt simetrice, explicația fiind poziția bilelor în tribotester și direcția de alunecare, iar pentru forțele mari profilometria arată deformații plastice puternice însoțite de formarea unor „maluri” pe contur.

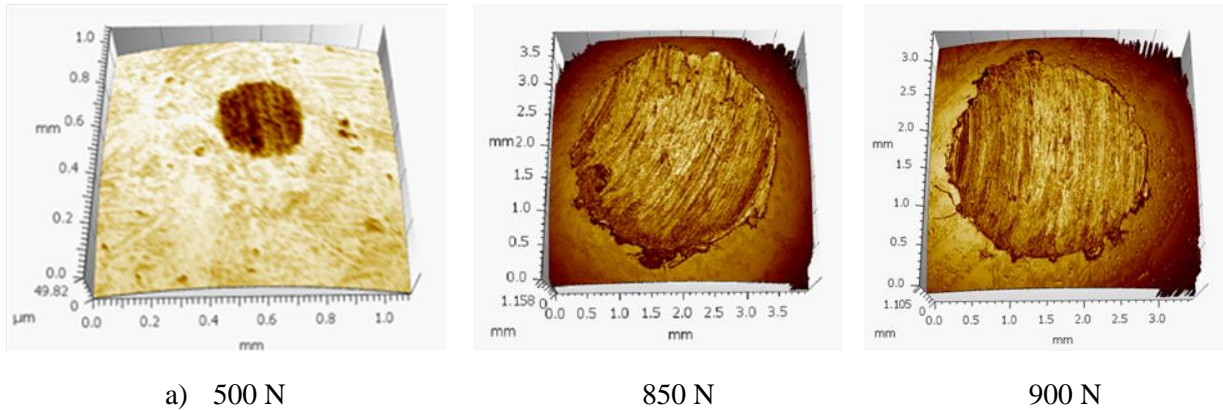


Fig. 3.21. Urme de uzură, reconstituite cu softul Mountains SPIP 8.1, de pe bila nerotitoare

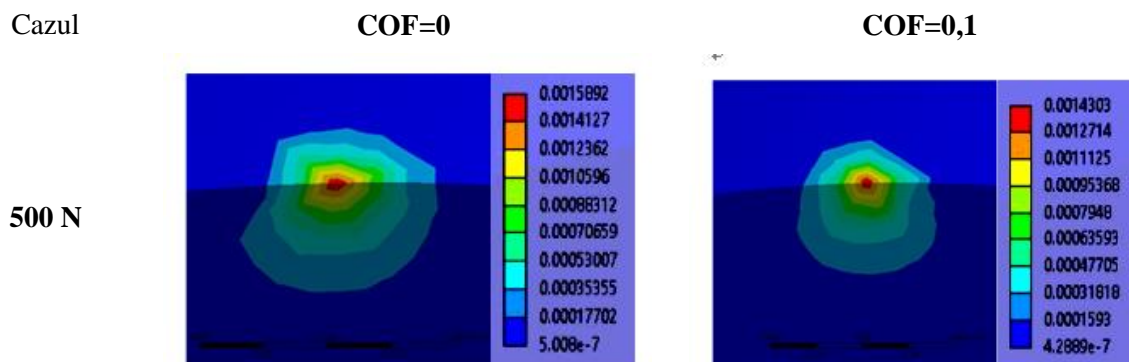


Fig. 3.22. Influența coeficientului de frecare asupra distribuției deformației elastice (mm/mm), $F=500$ N. Bila rotitoare a efectuat un unghi de rotație egal cu 360°

Figura 3.22 prezintă influența coeficientului de frecare asupra stării de deformații elastice pentru forța de 500 N, în cazul fără frecare, cât și în cazul cu frecare. Se observă valori foarte mici ale deformațiilor elastice pentru cazul forței analizate.

Începând cu 700 N valorile deformațiilor plastice cresc puțin (Fig. 3.23) și se observă atât pe bila rotitoare, cât și pe bila fixă pentru cazurile fără frecare, dar și pentru cazul cu frecare.

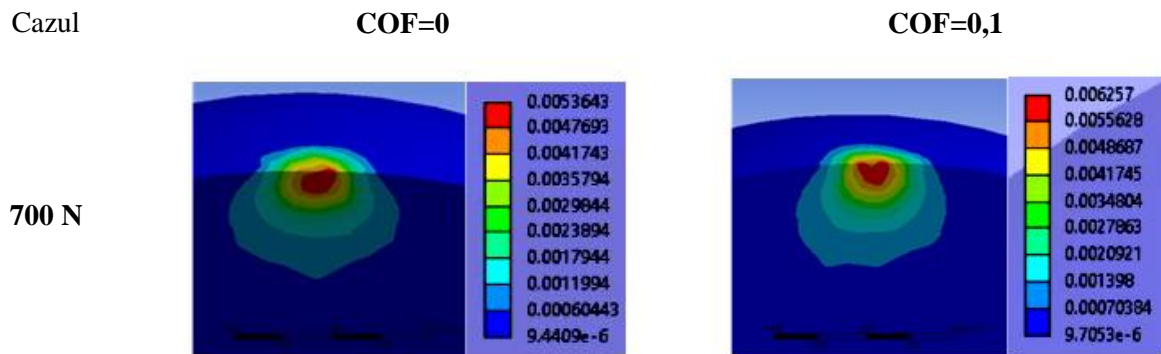


Fig. 3.23. Influența coeficientului de frecare asupra distribuției deformației elastice (mm/mm), $F=700$ N. Bila rotitoare a efectuat un unghi de rotație egal cu 360°

În Fig. 3.24 în care forța $F=900$ N se poate observa că valorile deformațiilor elastice aproape s-au dublat comparativ cu cazurile discutate anterior, atât pentru cazul cu coeficient de frecare nul, dar și pentru situația în care coeficientul de frecare are valoarea de 0,1.

În etapa a doua a simulării se observă constanța valorii maxime a deformației elastice pentru sarcina de 900 N, atât în cazul cu frecare, cât și în cazul fără frecare. Acest lucru se poate explica prin faptul că materialul iese din zona de elasticitate liniară.

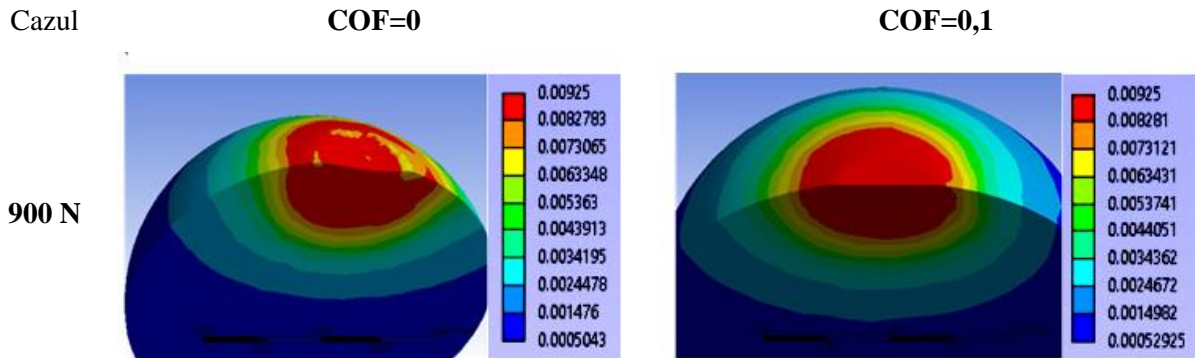


Fig. 3.24. Influența coeficientului de frecare asupra distribuției deformației elastice (mm/mm), $F=900$ N. Bila rotitoare a efectuat un unghi de rotație egal cu 300°

În Fig. 3.25 este prezentată influența coeficientului de frecare asupra stării de deformații plastice pentru forța de 500 N, în cazul fără frecare, cât și în cazul cu frecare. Se observă valori foarte mici ale deformațiilor elastice pentru cazul forței analizate.

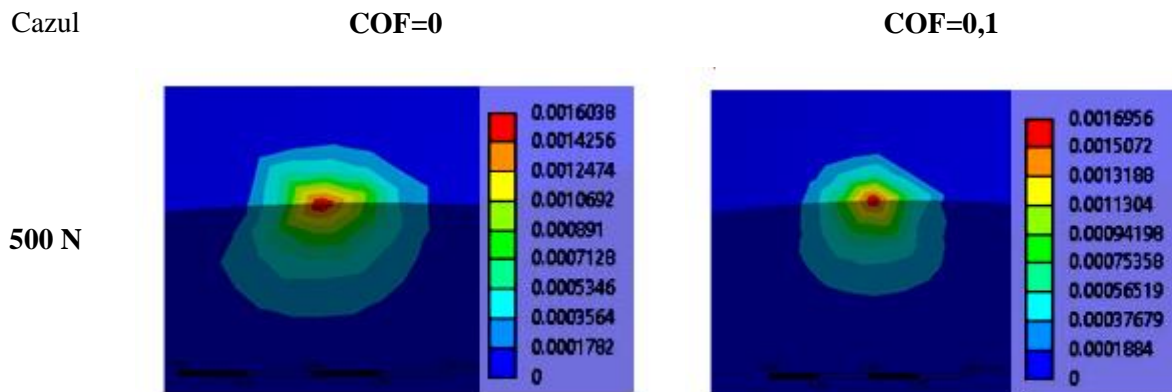


Fig. 3.25. Influența coeficientului de frecare asupra distribuției deformației plastice (mm/mm), $F=500$ N. Bila rotitoare a efectuat un unghi de rotație egal cu 360°

În Fig. 3.26 este prezentată influența coeficientului de frecare asupra stării de deformații plastice atunci când forța care acționează asupra bilei rotitoare este de 900 N. Valorile deformațiilor plastice au crescut semnificativ în comparație cu situația analizată anterior și se observă valori mult mai mari ale deformațiilor plastice obținute pentru cazul în care valoarea coeficientului de frecare este 0.

Pentru simularea la această forță ies în evidență valori mai mari ale deformațiilor plastice pe bila nerotitoare în comparație cu valorile obținute pe bila rotitoare, mai ales în situația în care nu avem frecare.

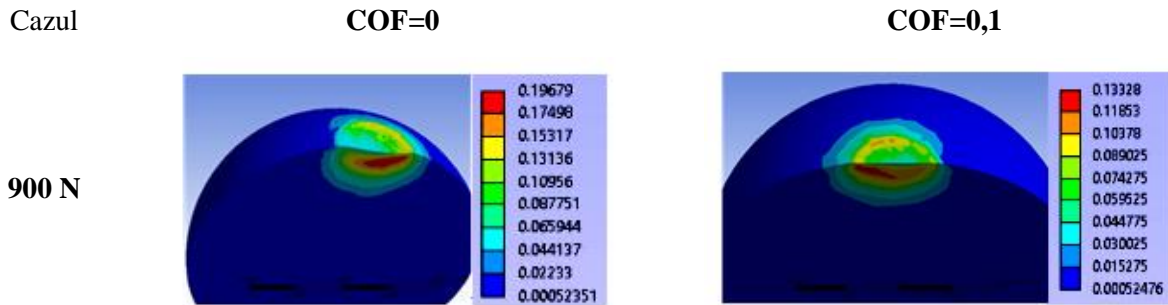


Fig. 3.26. Influența coeficientului de frecare asupra distribuției deformației plastice (mm/mm), F=900 N Bila rotitoare a efectuat un unghi de rotație egal cu 300°

Deformațiile totale se calculează însumând valorile deformațiilor elastice cu valorile deformațiilor plastice.

În Fig. 3.27 sunt date deformațiile totale și modul în care au fost influențate de către coeficientul de frecare. Simularea a fost efectuată pentru o forță F= 500 N în două situații. În prima situație nu a existat frecare, coeficientul de frecare fiind 0, iar în cea de-a doua s-a luat în calcul un coeficient de frecare egal cu 0,1. În figură sunt prezentate deformațiile totale pentru a doua etapă, de rotație, cu un unghi de rotație de 360°. Se poate observa că valorile deformațiilor totale sunt destul de mici, pe bila staționară.

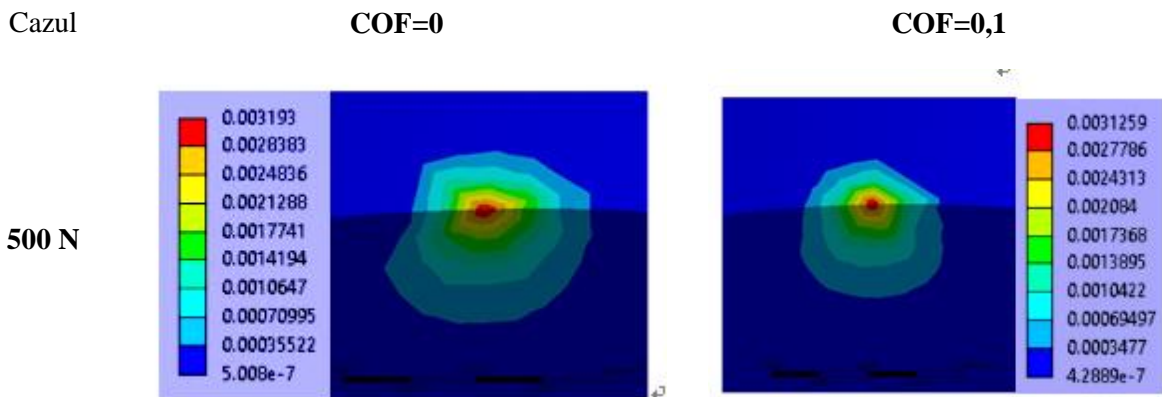


Fig. 3.27. Influența coeficientului de frecare asupra distribuției deformației totale (mm/mm) F=500 N. Bila rotitoare a efectuat un unghi de rotație egal cu 300°

Influența coeficientului de frecare asupra distribuției deformației totale este arătată și în Fig. 3.28, în care sarcina aplicată este de 900 N. Valori mai mari ale deformațiilor totale se observă pe bila nerotitoare în cazul în care nu există frecare.

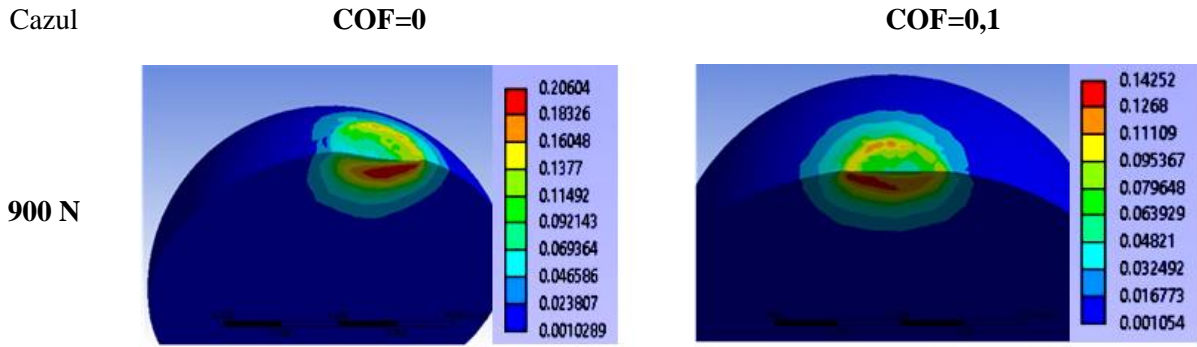


Fig. 3.28. Influența coeficientului de frecare asupra distribuției deformației totale (mm/mm)
F=900 N. Bila rotitoare a efectuat un unghi de rotație egal cu 300°

În Fig. 3.29 și în Fig. 3.30 sunt prezentate imagini cu izolinii ale deformațiilor plastice, pentru forțele simulate de 500 N și 900 N, atât pentru cazul în care nu există frecare, dar și pentru cazul în care se ia în considerare frecarea. Pe orice imagine cu izolinii de deformație, valorile deformațiilor plastice vor fi luate în considerare pentru măsurarea urmei de deformație pe model.

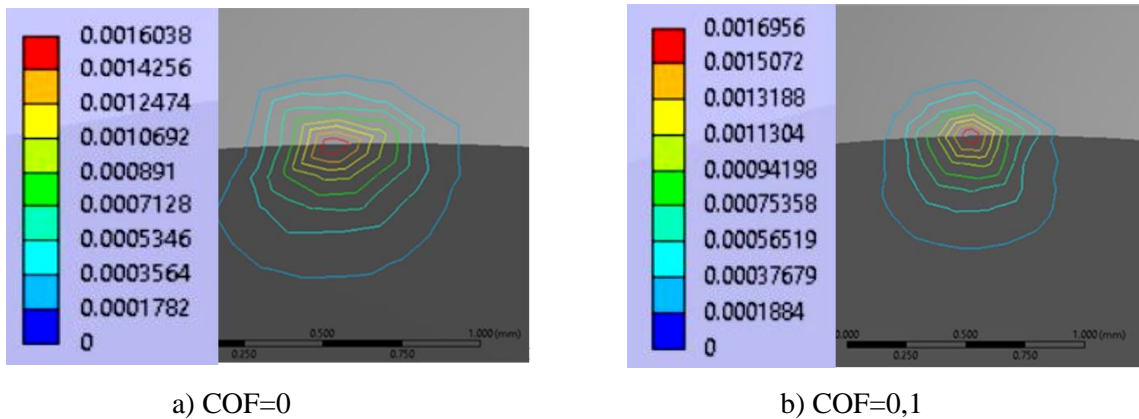


Fig. 3.29. Deformații plastice (mm/mm), F=500 N, izolinii

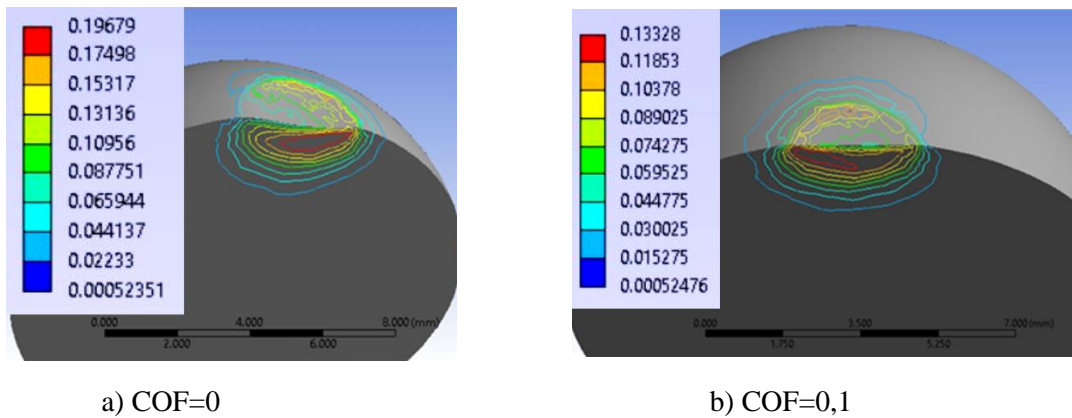


Fig. 3.30. Deformații plastice (mm/mm), F=900 N, izolinii

3.5. Concluzii

Modelul este original bazându-se pe constatări experimentale și din literatura studiată [89], [49], [59]. De asemenea, modelarea contactului cu alunecare pe un sistem simplificat al mașinii cu patru bile este originală.

Simularea este făcută în doi pași. Primul pas constă în încărcarea statică a celor două bile (extrase din modelul cu patru bile), iar în cel de-al doilea pas are loc o rotire parțială (300°) pentru a evidenția influența frecării și influența modelului de material asupra distribuției de tensiuni și deformații. Modelul constitutiv de material ia în considerare date experimentale obținute pe aceeași marcă de oțel, 100Cr6, cu aceeași calitate în privința durității, a modulului de elasticitate și a limitei de rupere.

Modelul este util pentru evaluarea distribuției de tensiuni și deformații, astfel încât se poate evalua un interval de lucru pentru parametrii de testare și trecerea de la regimul normal de lucru (sarcină acceptabilă pe toată durata de funcționare) la un regim sever (prin identificarea tensiunilor maxime și a deformațiilor elasto-plactice mari (deformații elastice și totale mari)).

Calitativ, modelul evidențiază forma elipsoidală a urmei de uzură datorită influenței forței de frecare și a mișcării de alunecare.

În acest model nu este simulată uzura și suprafețele sunt perfect netede, dar în realitate uzura abrazivă domină în regimul normal, în regimul sever, fiind predominante procese de deformare plastică (similare și în simulare) și uzura adezivă care nu este evidențiată prin simulare.

Valorile tensiunii echivalente, obținute în modelare pot fi utile comparându-se cu limitele de oboseală de contact pentru materialul bilelor.

Capitolul 4 Formularea în laborator a lubrifianților și metodologia de testare pe mașina cu patru bile

4.1. Testarea lubrifianților pe tribotesterul cu patru bile

Lubrifianțul este considerat a fi un corp care intervine între suprafețele unei cuple de frecare și care poate fi pus cu intenție sau poate exista în mod natural, pentru a micșora frecarea și/sau uzura.

Principalele proprietăți ale unui lubrifianț sunt: proprietăți antiuzură și anticorozive, rezistență la oxidare, stabilitate termică, coeficient de vâscozitate mare, creșterea randamentului sistemului, transmitere de putere (cuplaje hidraulice), evacuarea căldurii generate în urma frecării.

Prezența lubrifianțului este absolut necesară pentru ca zonele de frecare să fie funcționale și din acest motiv, lubrifianțul nu este considerat element secundar al tribosistemului [23].

Pentru testele efectuate în laboratoare, un rol de o importanță deosebită al unui lubrifianț, ar fi stabilirea proprietăților de extremă presiune și antiuzură.

Testarea lubrifianților este utilă deoarece se pot compara mai mulți lubrifianți testați în aceleași condiții, se pot verifica caracteristicile aditivilor și procentul de concentrație și lubrifianții pot fi incluși în diverse categorii din punct de vedere calitativ așa cum sunt cerute de beneficiari.

Pentru a formula un nou lubrifianț, etapa finală ar trebui să conțină testarea acestuia în condiții apropiate sau similare cu condițiile normale de exploatare. Testele trebuie repetate, iar lubrifianții testați ar trebui să fie într-un număr cât mai mare posibil.

Testarea pe tribotesterul cu 4 bile este recomandat de cercetători pentru simplitatea acestuia [17], [32], [72].

Tribotesterul este compus din trei bile staționare, care sunt apăsate de o a patra bilă aflată în mișcare de rotație. În general, calitatea unui lubrifianț este apreciată prin mărimea urmei de uzură.

Tribotesterul cu 4 bile (Fig. 4.1) este compus dintr-un ax de antrenare aflat în poziție verticală, care are la capătul lui inferior un dispozitiv de formă conică (1) care ajută la fixarea bilei mobile (2). Bila mobilă se sprijină pe cele trei bile staționare care sunt fixate prin intermediul unei piulițe (4) și a unei piese conice (5). Întregul sistem de fixare al bilelor staționare este instalat pe un rulment de presiune, ceea ce facilitează rotirea și deplasarea pe verticală. O forță este aplicată prin intermediul unei pârghii asupra sistemului de fixare al celor trei bile staționare. În momentul rotirii bilei mobile apare un moment de frecare care acționează asupra sistemului de prindere al bilelor staționare.

Lubrifianțul care trebuie testat se introduce în cupa unde se află cele trei bile staționare. Cantitatea de lubrifianț este de aproximativ 8-10 ml, acesta adăugându-se până în momentul când cele trei bile staționare sunt acoperite cu minim 3 ml de lubrifianț.

Bilele folosite pentru testare au fost obținute de la firma SKF; bilele sunt realizate din oțel crom aliat, având diametrul de $12,7 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$, conform standardului ISO 683-17:2014, sunt fin șlefuite, au o duritate mare (62...65 HRC) și o calitate a suprafeței ($R_a = 0,02...0,03 \text{ }\mu\text{m}$).

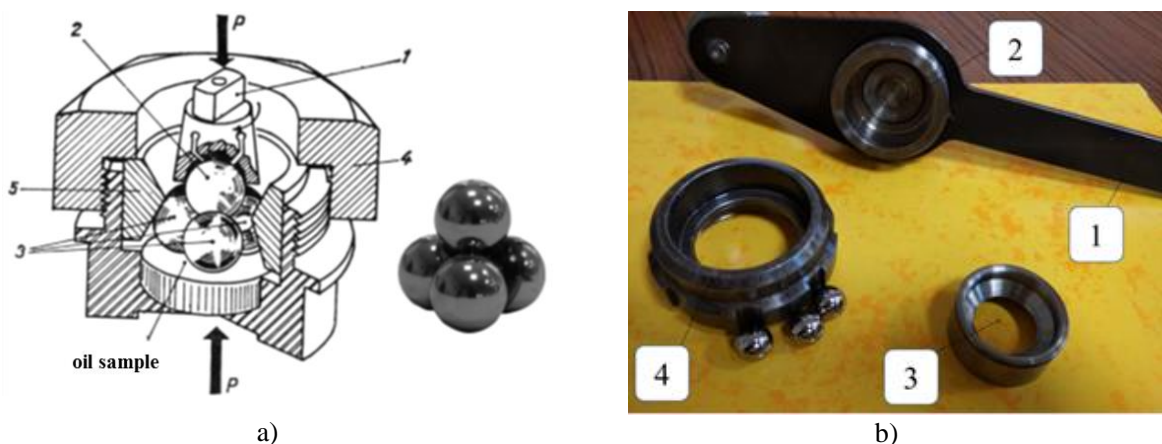


Fig. 4.1. Principalele elemente componente ale tribotesterului cu 4 bile

4.2. Parametri tribologici măsurabili prin teste pe tribotesterul cu patru bile

Acest subcapitol analizează parametrii care depind de diametrul urmei de uzură pe bilele staționare și coeficientul de frecare.

Evaluarea parametrilor uzurii se face cu următorii parametri:

- diametrul mediului al urmei de uzură pentru cele trei bile staționare (WSD); acesta se calculează făcând media aritmetică a șase diametre măsurate, două pentru fiecare bilă, primul diametru fiind măsurat de-a lungul direcției de alunecare, al doilea fiind perpendicular pe primul diametru măsurat,
- rata de uzură a urmei de uzură $w(WSD)$.

Coeficientul de frecare

Forța de frecare a fost măsurată de către autor prin folosirea unui ansamblu format dintr-o punte tensometrică (montată între brațul batiului tribotesterului cu patru bile și brațul cupei de fixare), un sistem care achiziționează datele transmise și un computer (Fig. 4.2)



Fig. 4.2. Schema ansamblului care conține sistemul de achiziție a datelor

4.3. Obținerea lubrifianților pe bază de ulei de rapiță și nano aditivi TiO_2 și ZnO . Metodologie de laborator.

Lubrifianții testați în acest studiu sunt lubrifianți pe bază de ulei de rapiță, de la Firma Expur din București, neaditivat sau aditivat cu nanomateriale pe bază de oxizi metalici (ZnO și TiO_2), în diverse concentrații (0,25 wt%, 0,5 wt% și 1,0 wt%). Compoziția în acizi grași a uleiului de rapiță analizat este prezentată în Tabelul 4.1 și a fost efectuată la firma Expur București, cu ajutorul unui cromatograf.

Tabelul 4.1. Compoziția în acizi grași a uleiului de rapiță testat

Acid gras	Simbol	Concentrația, %wt
Acid miristic	C14:0	0,06
Acid palmitic	C16:0	4,6
Acid palmitoleic	C16:1	0,21
Acid heptadecanoic	C17:0	0,07
Acid heptadecenoic	C17:1	0,18
Acid stearic	C18:0	1,49
Acid oleic	C18:1	60,85
Acid linoleic	C18:2	19,9
Acid linolenic	C18:3	7,64
Acid arahidic	C20:0	0,49
Acid eicosenoic	C20:2	1,14

Aditivii utilizați în această teză de doctorat (Fig. 4.3) au fost furnizați de firma PlasmaChem și au următoarele proprietăți:

- **ZnO**: dimensiunea medie a particulei ~14 nm, suprafața specifică ~ 30 m²/g,
- **TiO₂**: dimensiunea medie a particulei ~21 nm, suprafața specifică ~50 m²/g.

Dispersia aditivilor în uleiul de bază este o chestiune care trebuie soluționată pentru acest tip de aditivi anti-uzură. Ținând cont de faptul că uleiul de rapiță testat este un complex de trigliceride ale acizilor grași (Tabelul 4.3), autorul propune un mod de realizare și obținere a unei dispersii mai bune.

Etape pentru formularea lubrifianților:

- se amestecă aditivul (mixare mecanică) cu o cantitate egală de guaicol, pentru o perioadă de 20 de minute; agentul de dispersie (guaicolul) este compatibil cu uleiul vegetal folosit pentru testare, dar și cu aditivii utilizați,

- se adaugă treptat uleiul de rapiță, care a fost măsurat în prealabil pentru a obține 200 g de lubrifiant,

- se amestecă cu un agitator magnetic timp de 1 oră,

- se ultrasonază și se răcește lubrifianțul aditivat în pași de câte 10 minute; lubrifianțul se încălzește la aproximativ 70...75 °C în timpul ultrasonării; răcirea s-a făcut timp de 1 oră; ultrasonarea și răcirea lubrifianțului a fost repetată de 5 ori pentru a avea un timp total de ultrasonare de 60 de minute. Regimul de ultrasonare are următorii parametri: frecvență 20 kHz ±500 Hz și putere de 100 W, în regim continuu.

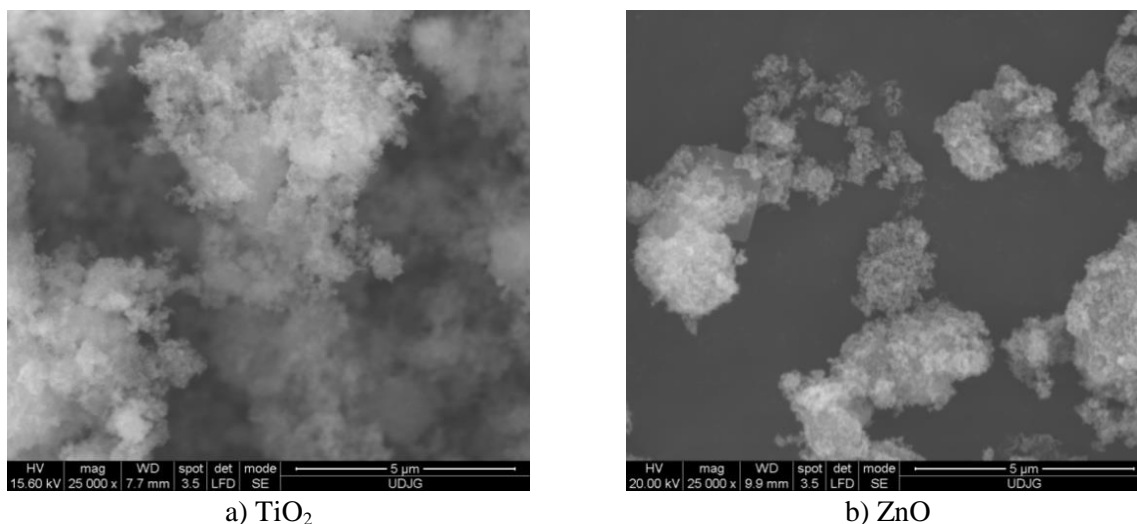


Fig. 4.3. Imagini SEM cu nanoaditivii testați

4.4. Planul de teste pe tribotesterul cu patru bile

Parametri de încercare, pentru fiecare lubrifiant testat au fost:

a) în regim normal

- forța de încărcare – 100 N, 200 N și 300 N,
- viteza de alunecare – 0,38 m/s, 0,53 m/s și 0,69 m/s, corespunzătoare turațiilor axului tribotesterului cu patru bile de 1000 rpm, 1400 rpm și 1800 rpm,
- timpul de încercare – 60 minute (±1%),
- concentrația de aditiv în lubrifianții formulați este de 0,25%, 0,50% și 1%(wt).

b) în regim sever

- forța de încărcare – de la 500 N, până la 900 N (din 50 N în 50 N),
- viteza de alunecare – 0,53 m/s corespunzătoare turației de 1400 rpm,
- timpul de încercare - 1 minut (±1%),
- concentrația de aditiv în lubrifianții formulați este de 0,25%, 0,50% și 1%(wt)

Diametrele urmelor de uzură au fost măsurate cu ajutorul unui microscop optic NeoPhot2.

Figura 4.4 prezintă schematic testele efectuate de autor și regimurile de testare.

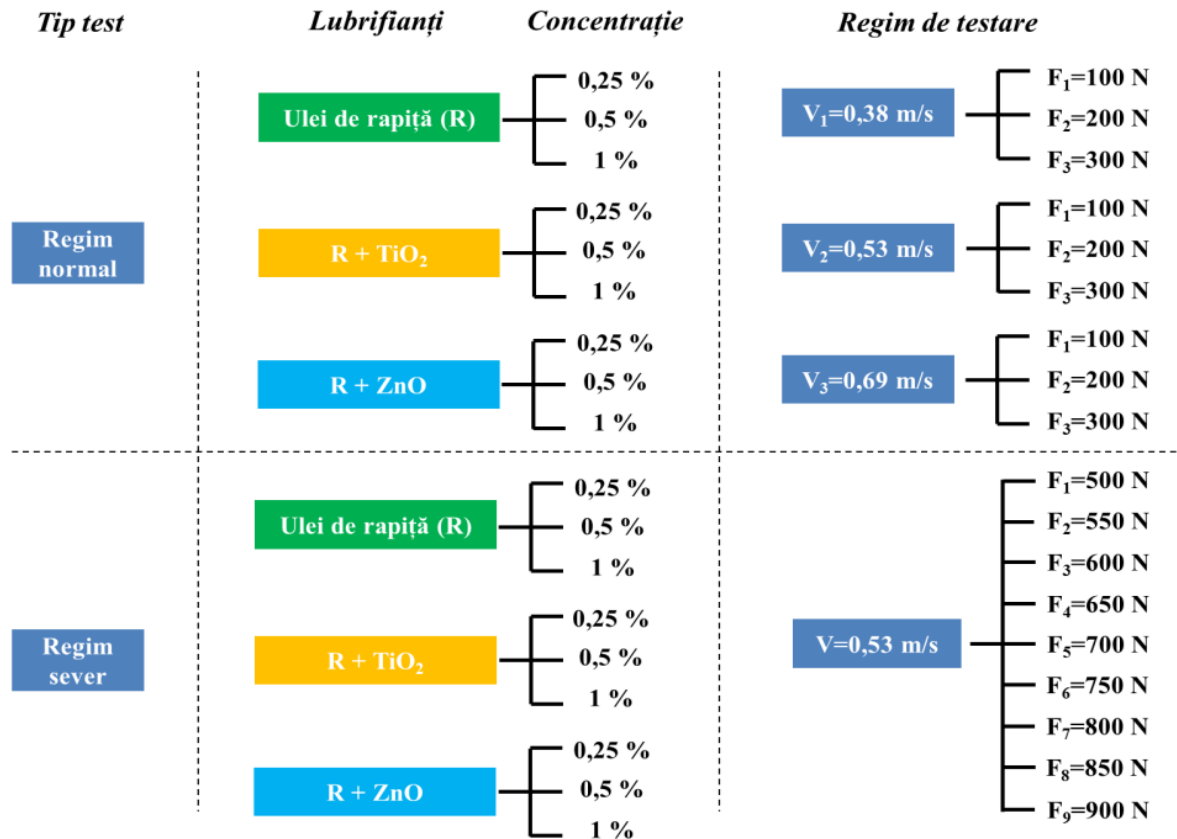


Fig. 4.4. Reprezentarea schematică a testelor efectuate de autor și regimurile de testare

4.5. Concluzii

Pe baza documentației făcute de autor asupra aditivării uleiurilor vegetale cu modificatori ai frecării și uzurii, autorul a ales uleiul de rapiță brut ca ulei de bază și ca modificatori de frecare și uzură TiO₂ și ZnO. Autorul acestui studiu a preluat tehnologia de amestecare/dispersie a nanoparticulelor din lucrări anterioare [16], [30], realizate în cadrul Centrului de Cercetare "Mecanica și Tribologia Straturilor Superficiale" din Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați. Formularea lubrifianților nanoaditivați s-a bazat pe un regim de sonicare și de răcire alternativă repetat de câteva ori (3-5 ori), după care, lubrifianțul obținut cu concentrații diferite de aditiv a fost supus unei campanii de testare. Spre deosebire de multe alte rapoarte științifice referitoare la testarea lubrifianților, în care se pune accentul pe un singur regim de testare, această teză a avut ca obiectiv testarea lubrifianților nou formulați atât în regim normal, cât și în regim sever. Această abordare nouă a făcut posibilă evidențierea rolului nanoaditivilor în regimul sever, în care, deși nu au format o peliculă continuă au dus totuși la protejarea suprafețelor de contact și la reducerea parametrului WSD caracteristic testelor pe mașina cu 4 bile.

Capitolul 5

Comportarea tribologică a lubrifianților formulați, pe tribotesterul cu patru bile.

Rezultate experimentale.

5.1. Parametrii tribologici analizați

Un lucru foarte important este stabilirea unei metodologii de testare pentru a evalua din punct de vedere calitativ un lubrifianț.

Testele tribologice se pot grupa în:

- teste în regim sever,
- teste în regim normal de lucru.

În acest capitol s-au analizat următorii parametri tribologici:

- **coeficientului de frecare**, mai exact valorile acestui parametru pe parcursul unui test; o valoare instantanee, la un moment t , valoarea medie pe durata întregului test (în regimul normal durata testului a fost de 1 oră, înregistrându-se 7200 de valori, câte două înregistrări pe secundă, iar în regim sever testul a avut o durată de 1 minut) și intervalul în care variază coeficientul de frecare pe parcursul testului,

- **diametrul urmei de uzură**, notat cu WSD, un parametru specific tribotesterului cu patru bile. Diametrul urmei de uzură reprezintă media aritmetică a celor șase diametre ale urmelor de uzură măsurate, două de pe fiecare bilă staționară,

- **rata de uzură a diametrului urmei de uzură**, notată cu $w(\text{WSD})$

$$w(\text{WSD}) = \frac{\text{WSD}}{F \times L} \text{ [mm/N} \cdot \text{m]} \quad (5.1)$$

în care WSD reprezintă diametrul urmei de uzură, F reprezintă sarcina, L distanța de alunecare.

Distanțele de alunecare L sunt diferite datorită duratei unui test în regim normal de lucru (1 oră): $L_{1000} (v = 0,38 \text{ m/s}) = 1378,8 \text{ m}$, $L_{1400} (v = 0,53 \text{ m/s}) = 1933,2 \text{ m}$, $L_{1800} (v = 0,69 \text{ m/s}) = 2487 \text{ m}$.

5.2. Evaluarea frecării pentru uleiul de rapiță neaditivat

Frecarea a fost discutată în această lucrare prin:

- evaluarea calitativă a evoluției în timp a COF,
- coeficientul de frecare ca medie a înregistrărilor într-o oră și intervalul de împrăștiere a valorilor acestea pentru două teste.

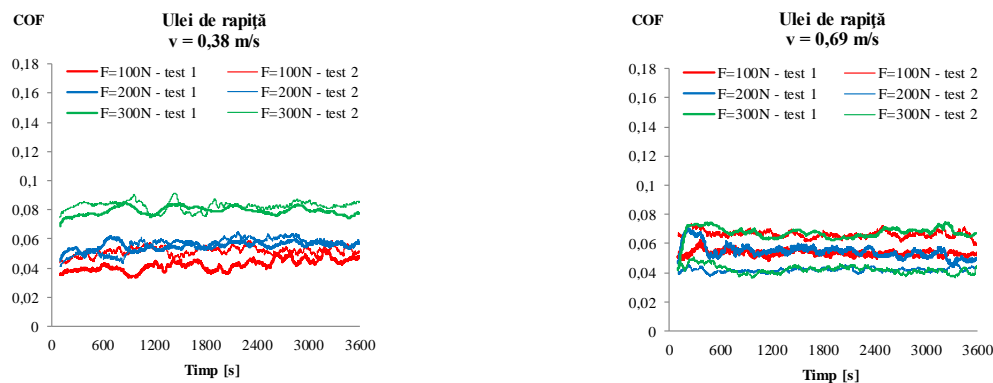


Fig. 5.1. Evoluția COF în timp în funcție de sarcină și viteză, pentru două teste cu aceiași parametri (F, v) pentru uleiul de rapiță neaditivat

Graficele din Fig. 5.1 sunt realizate cu ajutorul unei medii mobile pentru 200 de valori. Autorul a ales acest mod de reprezentare pentru a evidenția tendința de evoluție a COF pe durata testului de 1 oră, pentru care s-au înregistrat 7200 de valori (cu o eșantionare de 2 valori pe secundă).

Din grafice se observă cum creșterea vitezei a dus la aglomerarea valorilor obținute într-un interval mai mic. Dacă la $v=0,38 \text{ m/s}$ coeficientul de frecare este între 0,04 și 0,09, la $v=0,69 \text{ m/s}$ COF este situat între 0,05 și 0,08. COF pentru uleiului de rapiță este mai puțin sensibil la sarcină la viteze mari. La viteze mari se observă formarea unei pelicule.

5.3. Evaluarea uzurii pentru uleiul de rapiță neaditivat

Uzura a fost evaluată prin doi parametri caracteristici tribotesterului cu patru bile și anume:

- diametrul urmei de uzură (WSD),
- rata de uzură a diametrului urmei de uzură $w(WSD)$.

În Fig. 5.2 este prezentată evoluția diametrului urmei de uzură pentru uleiul de rapiță neaditivat, testat la diferite sarcini și viteze de alunecare. Se observă o creștere a valorilor WSD odată cu creșterea sarcinii și a vitezei de alunecare. Cea mai mare valoare a WSD s-a obținut pentru forța $F=300$ N, la viteza $v=0,69$ m/s.

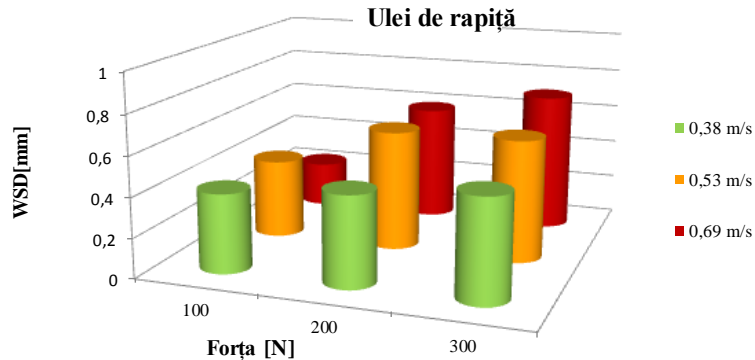


Fig. 5.2. Evoluția diametrului urmei de uzură pentru uleiul de rapiță neaditivat

Chiar dacă distanțele de alunecare diferă, tendința evoluției diametrului urmei de uzură este aceeași, dar crescătoare și aproape liniară, ceea ce înseamnă că testele au evidențiat schimbarea ponderii proceselor de uzură.

Rata de uzură a diametrului urmei de uzură (Fig. 5.3) este un parametru de uzură foarte important deoarece este calculat pentru aceeași durată de testare, dar la distanțe de alunecare diferite.

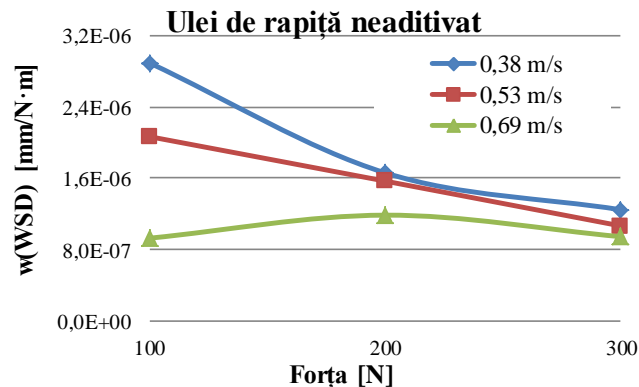
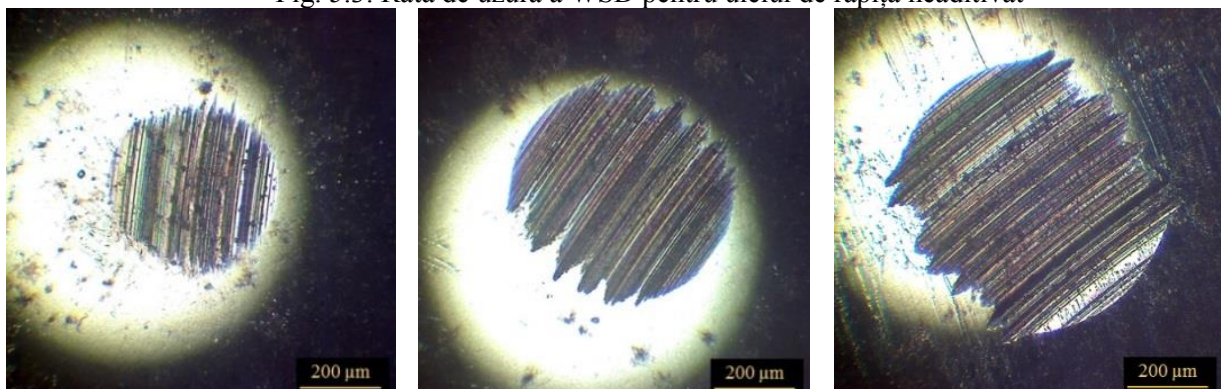


Fig. 5.3. Rata de uzură a WSD pentru uleiul de rapiță neaditivat



F=100 N

F=200 N

F=300 N

Fig. 5.4. Urme de uzură obținute la testare cu lubrifianț rapiță neaditivat și $v=0,69$ m/s

Figura 5.4 prezintă urme de uzură pentru testul cu ulei de rapiță neaditivat, pentru $v=0,69$ m/s. După cum se poate observa urma de uzură a crescut odată cu forța, totodată evidențiindu-se și evoluția procesului de uzură. La $F=300$ N, sunt mai multe zone de smulgere decât pentru $F=100$ N și $F=200$ N.

5.4. Lubrifianți aditivați cu TiO₂

Coeficientul de frecare pentru uleiul de rapiță aditivat cu TiO₂

La aditivarea uleiului de rapiță cu 1% TiO₂ (Fig. 5.5) se observă împrăștierea coeficientului de frecare, împrăștierea fiind mai mare la viteza intermediară de 0,53 m/s.

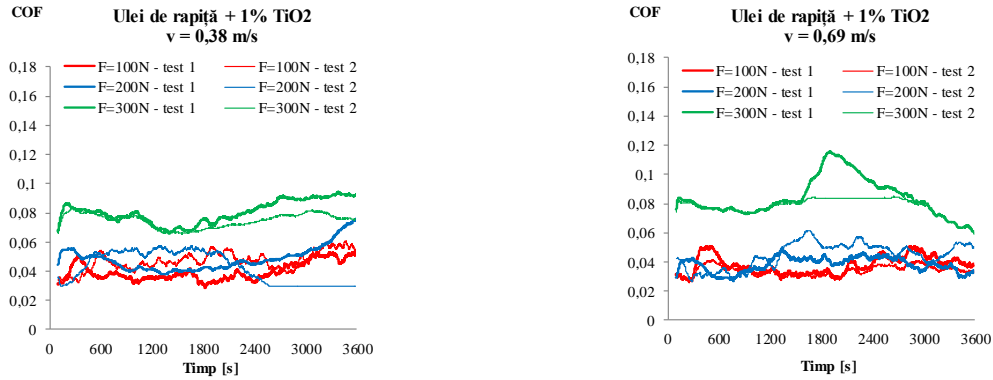


Fig. 5.5. Evoluția COF în timp pentru lubrifianțul aditivat cu 1% TiO₂

În Fig. 5.6 sunt prezentate medii ale coeficientului de frecare, pentru uleiul de rapiță aditivat cu TiO₂. În general, valoarea cea mai mare a coeficientului de frecare este data de sarcina mare și viteza mică, conform teoriei hidroelastodinamice [22].

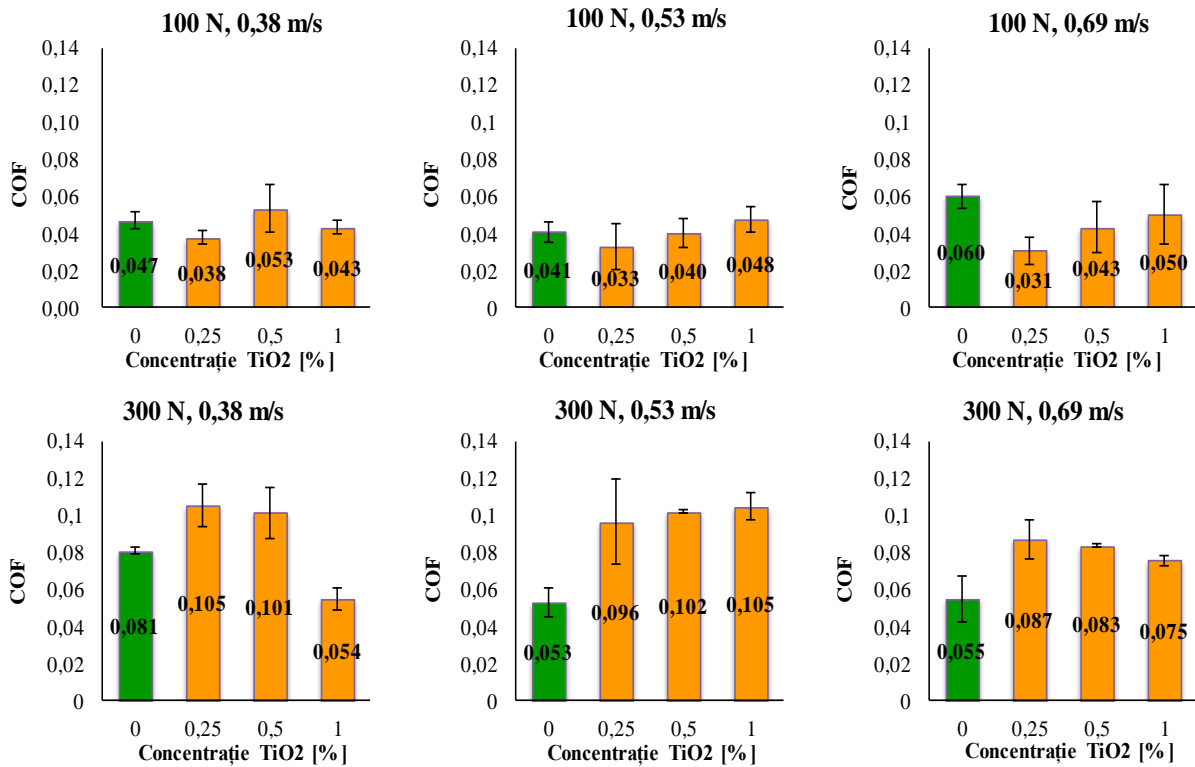


Fig. 5.6. Valori medii și intervalul valorilor medii pentru două teste cu aceiași parametri (F, v, C)

Evaluarea uzurii

În Fig. 5.7 este prezentat diametrul mediu al urmei de uzură pentru lubrifianții aditivați cu TiO₂. Se observă că diametrul urmei de uzură crește odată cu sarcina, valorile cele mai mari obținându-se la sarcini mari. Influența aditivului asupra uzurii este benefică, în special la viteza de alunecare mică, 0,38 m/s, ceea ce înseamnă că sub această viteză, particulele rămân în contact și protejează suprafața.

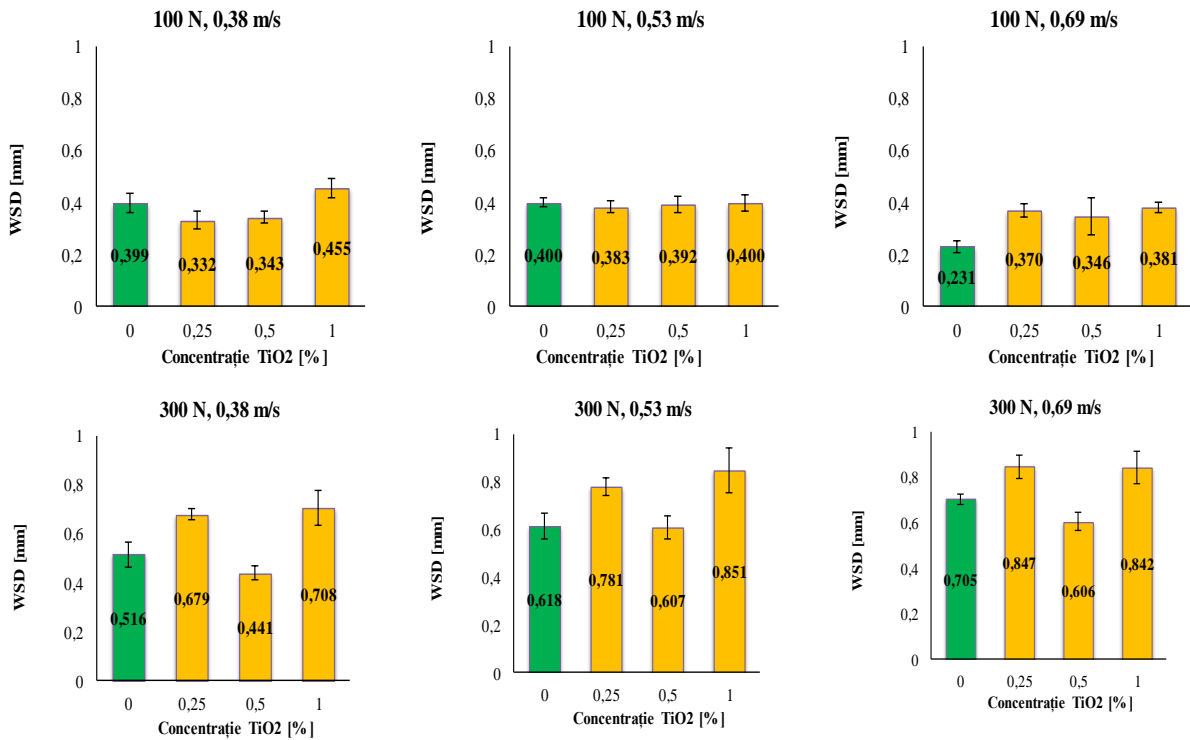


Fig. 5.7. WSD pentru lubrifianții aditivați cu TiO₂

Analizând imaginile cu urme de uzură măsurate la microscopul optic (Fig. 5.9), se observă o creștere proporțională a urmei de uzură odată cu creșterea sarcinii.

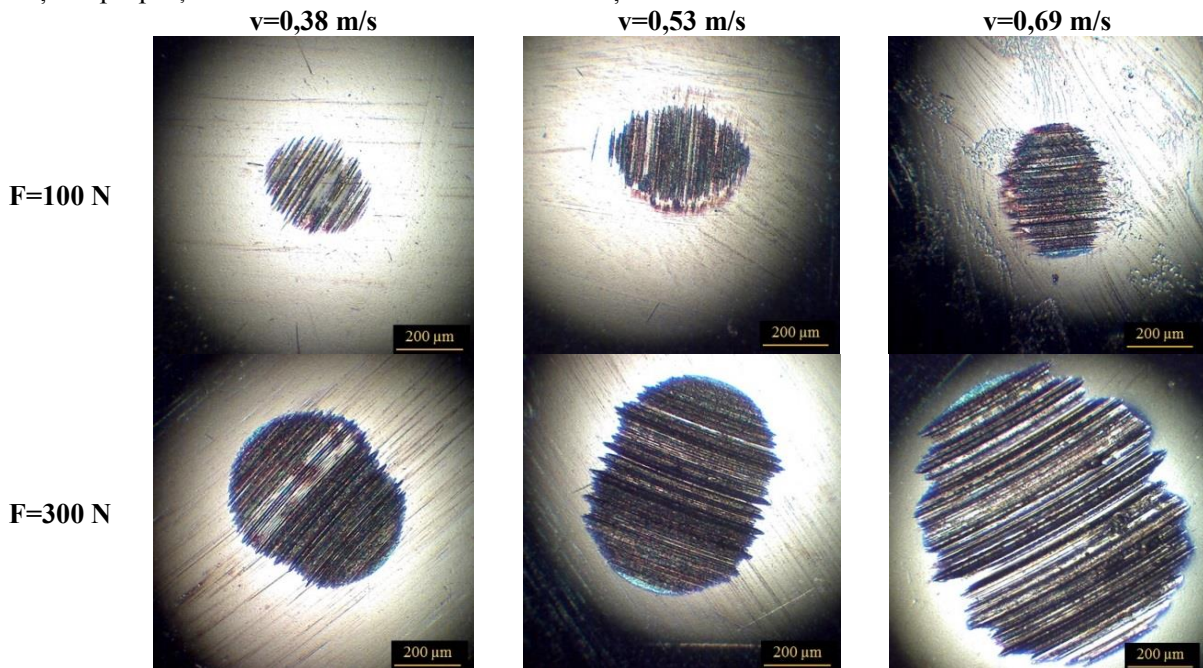


Fig. 5.8. Urme de uzură obținute la testare cu lubrifianț rapiță + 1% TiO₂

Rata de uzură a diametrului urmei de uzură

Rata de uzură ajută mai mult la stabilirea influenței concentrației de nanoaditiv. Din graficele din Fig. 5.9, se observă:

- o scădere a w (WSD) cu sarcina pentru toate concentrațiile și vitezele, pentru lubrifianții aditivați,
- panta dependenței de viteză, pentru aceeași sarcină este mai mică,

- aditivarea cu acest modificator de frecare și uzură ar fi justificată în domeniul forței mari pentru toate vitezele.

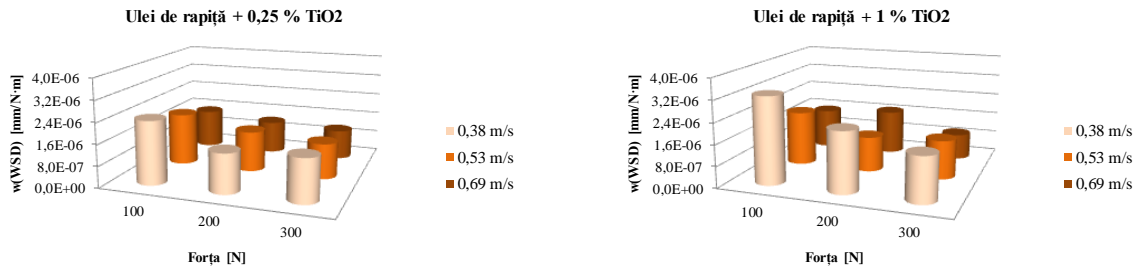


Fig. 5.9. Rata de uzură a WSD, în funcție de regimul de testare (F , v) și de concentrația de TiO_2

5.5. Lubrifianți aditivi cu ZnO

La aditivarea uleiului de rapiță cu 1% ZnO (Fig. 5.10) se observă o împrăștiere a valorilor coeficientului de frecare. Aditivarea cu ZnO crește coeficientul de frecare la viteze mici, iar intervalele de împrăștiere sunt mai mari. Aditivarea cu 1% ZnO nu este oportună, dar dacă se analizează și parametri de uzură, se acceptă creșterea coeficientului de frecare.

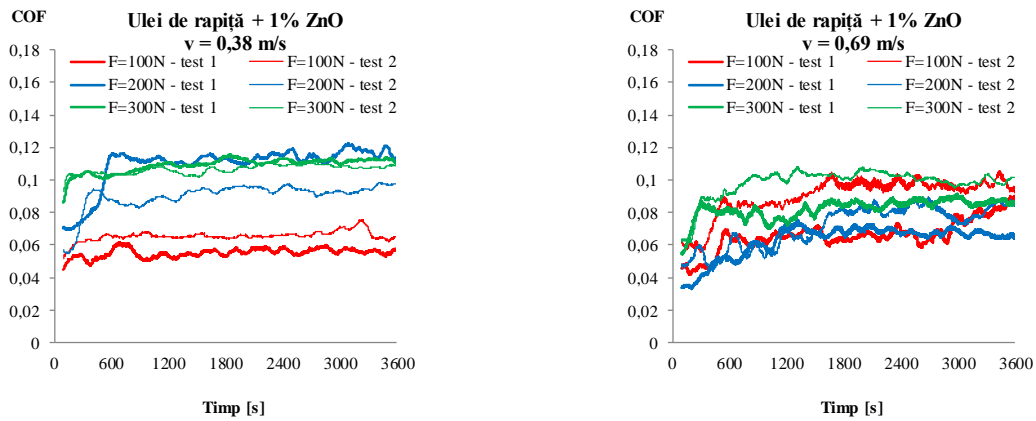


Fig. 5.10. Evoluția COF în timp pentru lubrifianțul aditivat cu 1% ZnO

În Fig. 5.11 sunt prezentate valorile medii ale coeficientului de frecare și intervalul acestora pentru uleiul de rapiță aditivat cu nanoparticule de ZnO

Au fost efectuate două teste, cu aceiași parametri, forță, viteză și concentrație de aditiv, pentru uleiul de rapiță neaditivat și aditivat cu 1% ZnO.

Din grafice se poate observa că valorile medii ale coeficientului de frecare, pentru lubrifianții aditivi, au fost mai mari decât valorile medii ale coeficientului de frecare obținute pentru uleiul de rapiță neaditivat.

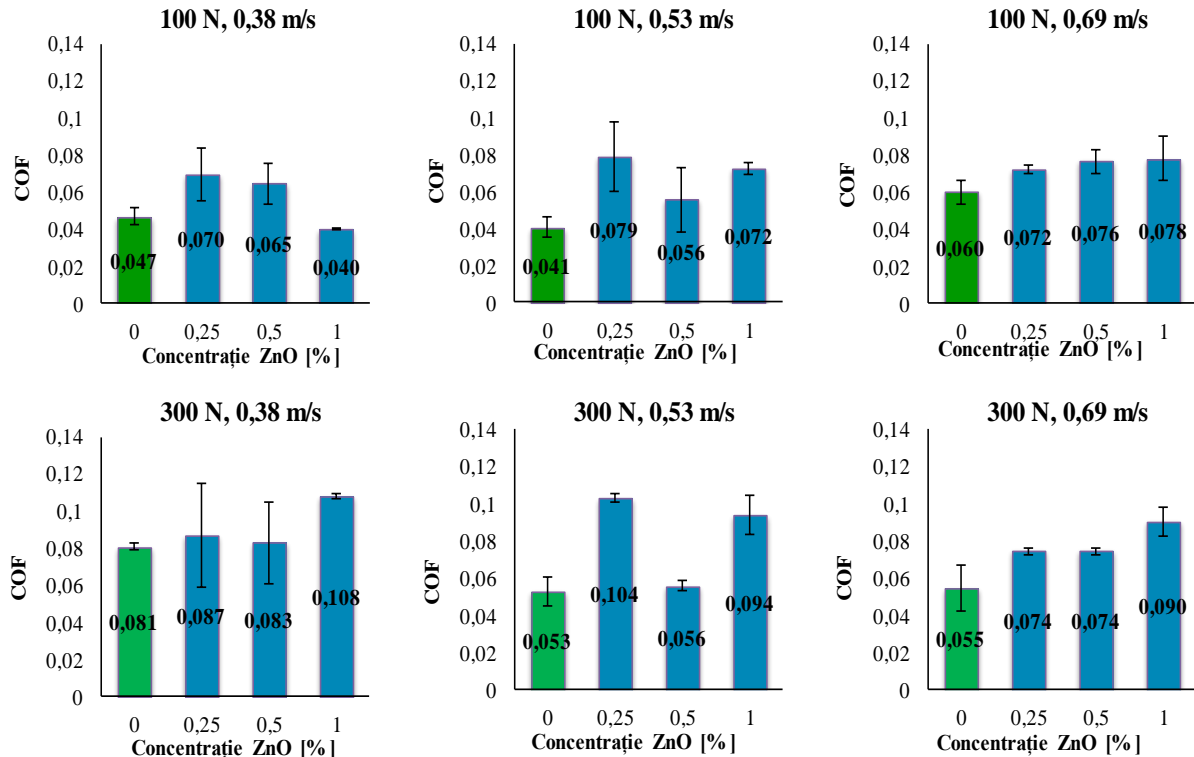


Fig. 5.11. Valori medii și intervalul valorilor medii ale COF, pentru două teste efectuate cu aceiași parametri (F, v, C)

Parametrii de uzură

Autorul este de acord cu concluzia cercetătorului Shahnazar [69] cum că nanoparticulele de ZnO ar putea reduce uzura prin depunerea pe suprafețele de alunecare, dar din imaginile SEM (Fig. 5.12) se observă că ZnO nu formează o peliculă protectoare pe suprafață, așa cum spun și alți cercetători.

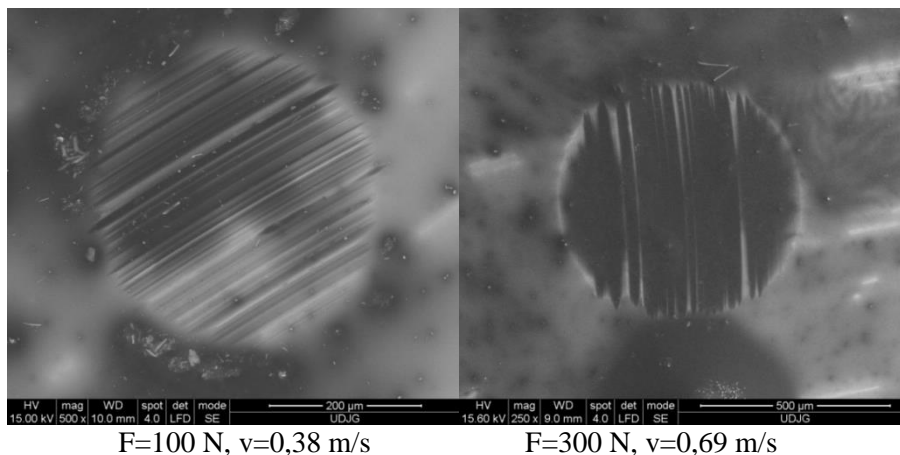


Fig. 5.12. Imagini SEM ale urmelor de uzură pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% ZnO

La toate regimurile testate, valorile medii ale diametrelor urmelor de uzură sunt obținute într-un interval îngust și nici intervalele de împrăștiere nu sunt mari (Fig. 5.13).

Dar diferențele sunt prea mici pentru a evidenția o tendință și o influență a aditivului sau a regimului de testare. Cu alte cuvinte, uzura este mai puțin sensibilă cu viteza și sarcina. Un astfel de nanoaditiv ar putea fi recomandat acolo unde există un regim variabil de sarcină și viteză.

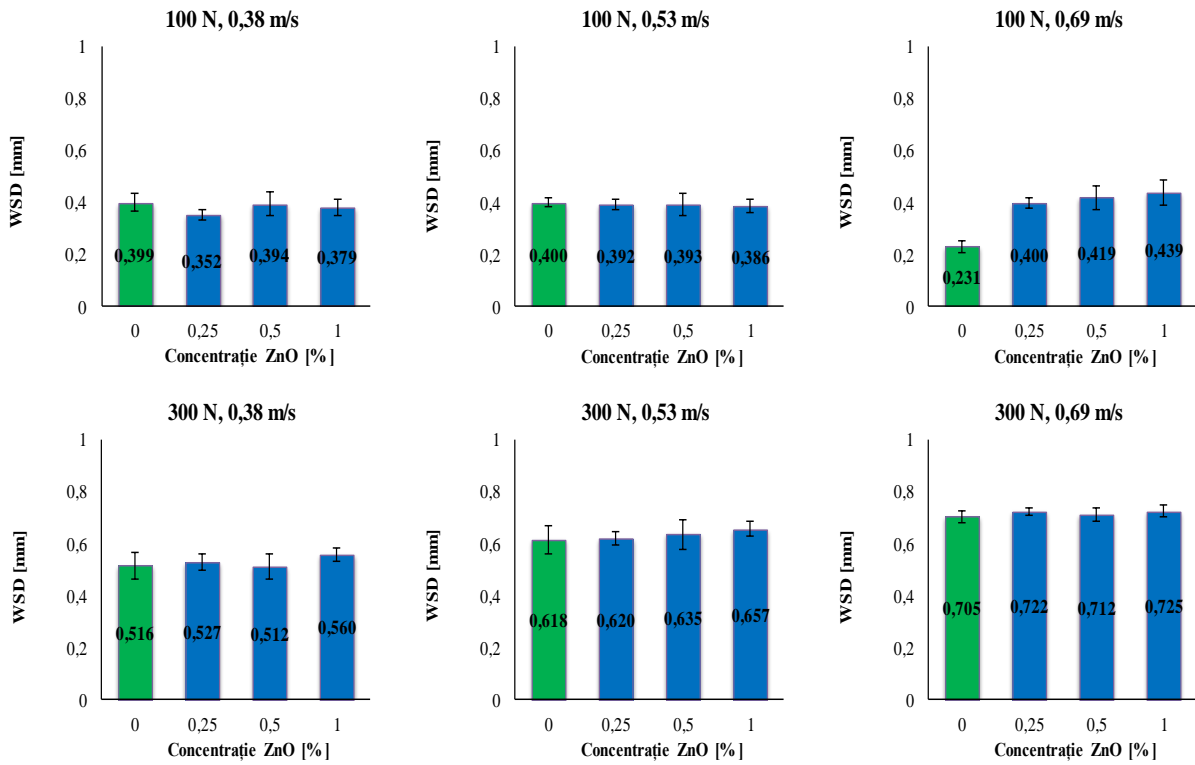


Fig. 5.13. Diametrul mediu al urmei de uzură pentru lubrifianții aditivăți cu ZnO

În Fig. 5.14 sunt date imagini de la microscopul optic ale urmelor de uzură obținute la testarea uleiului de rapiță aditivat cu 1% ZnO.

Se observă că nu există o diferență foarte mare între imaginile urmelor de uzură, fapt confirmat și de graficele diametrului urmei de uzură din Fig. 5.13.

Urmele de uzură cresc odată cu creșterea sarcinii, la sarcinile cele mai mari avem și cele mai mari urme de uzură pentru cazul aditivării cu nanoparticule de ZnO.

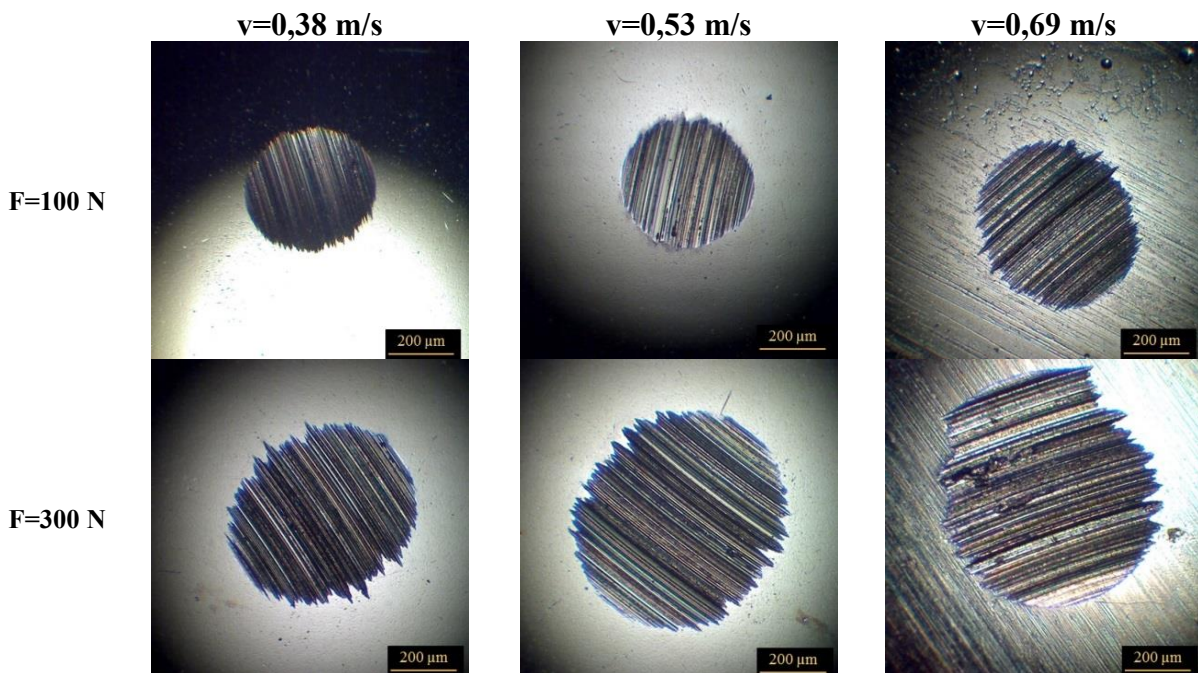


Fig. 5.14. Urme de uzură obținute la testarea uleiului de rapiță aditivat cu 1% ZnO

Rata de uzură a diametrului urmei de uzură

Din Fig. 5.15 se observă că există o rată de uzură mare la sarcini și viteze mici, adică în momentul în care creștem sarcina, rata de uzură a diametrului urmei de uzură scade. Acest lucru se traduce prin faptul că există uzură abrazivă mai puternică, care apare atunci când lubrifianțul nu formează peliculă și în cazul în care aditivul nu poate proteja suprafața.

Analizând graficele se poate observa că rata de uzură a diametrului urmei de uzură are o tendință de scădere odată cu creșterea sarcinii. La forța cea mai mare de 300 N rata de uzură a diametrului urmei de uzură nu este foarte influențată de viteză. Graficele au aceeași tendință, adică sunt asemănătoare din punct de vedere al aspectului indiferent de procentul concentrației de nanoaditiv.

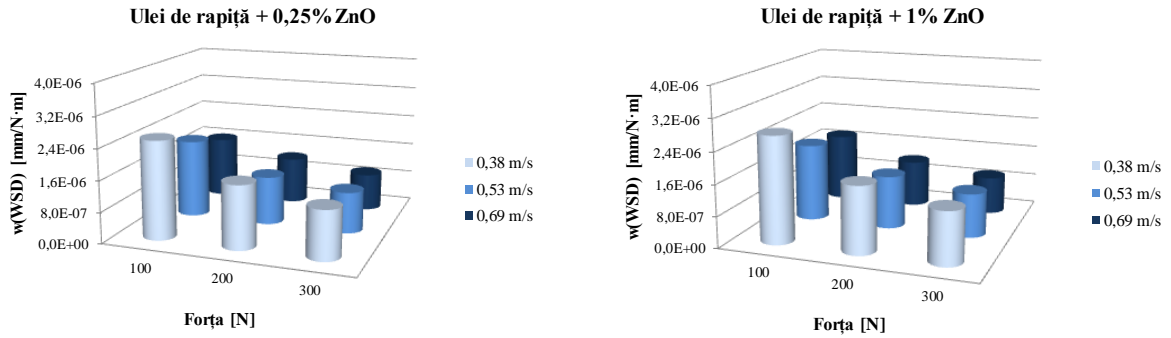


Fig. 5.15. Rata de uzură a WSD, în funcție de regimul de testare (F, v) și de concentrația de ZnO

5.6. Temperatura în baia de ulei la sfârșitul testului

O sinteză a datelor experimentale referitoare la temperatura în baia de ulei la sfârșitul testului este dată în Fig. 5.16 și Fig. 5.17.

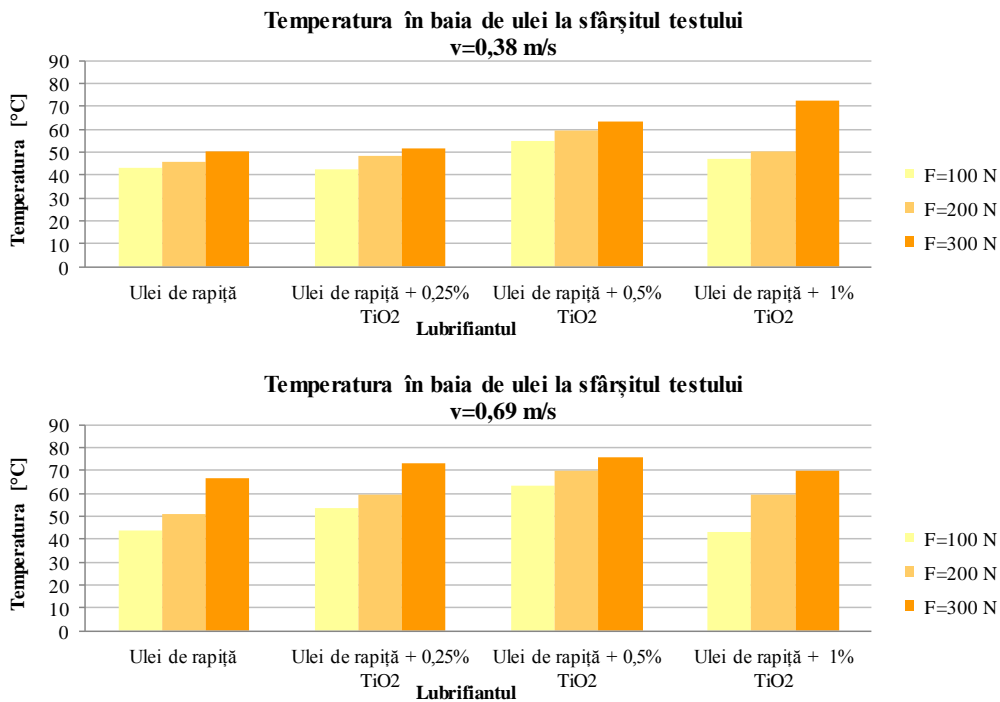


Fig. 5.16. Valorile temperaturii înregistrate la sfârșitul testului, pentru lubrifianții aditivați cu nanoparticule de TiO₂

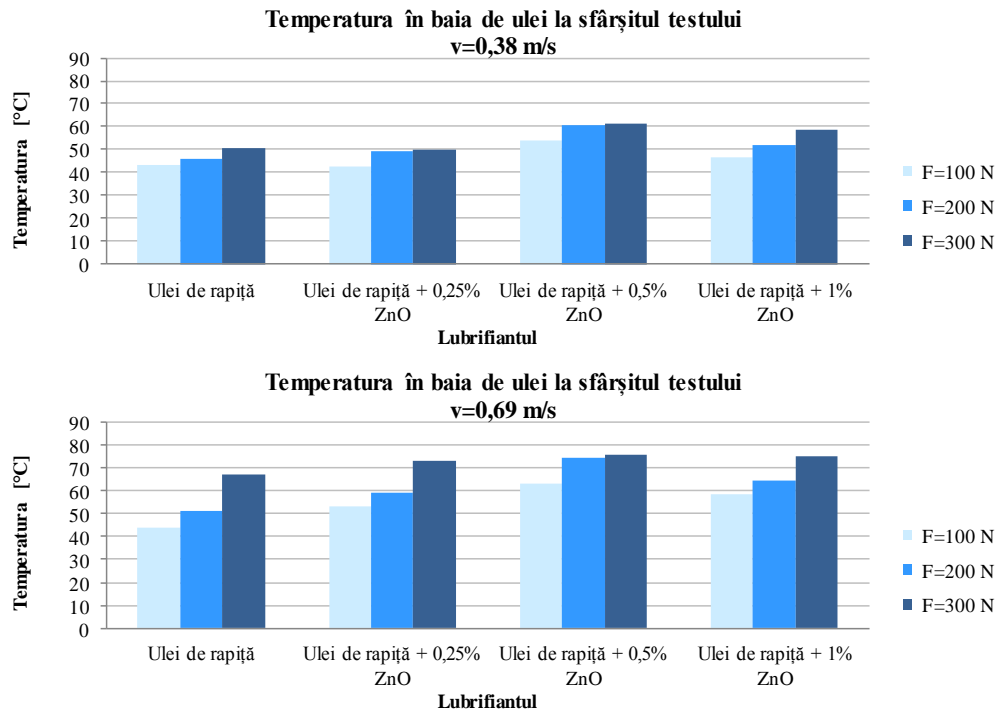


Fig. 5.17. Valorile temperaturii înregistrate la sfârșitul testului, pentru lubrifianții aditivați cu nanoparticule de ZnO

Diferența dintre înregistrarea finală a temperaturii, la finalul testului, este mică pentru regimurile scăzute ($v=0,38$ m/s), iar valoarea temperaturii este în intervalul 43-55 °C. Pentru viteza de alunecare, $v=0,69$ m/s, valorile temperaturii sunt distribuite pe un interval mai mare.

Pentru majoritatea regimurilor severe, temperatura finală înregistrată pentru uleiul de rapiță este de 70 °C.

Pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% TiO_2 , temperatura la finalul testului, pentru $v=0,38$ m/s este cuprinsă în intervalul 72-82 °C, iar pentru viteza $v=0,69$ m/s, temperatura este de 70,2 °C (Fig. 5.16).

Uleiul de rapiță aditivat cu 1% ZnO are o temperatură ridicată, cuprinsă între 50-60 °C pentru viteza $v=0,38$ m/s, iar pentru $v=0,69$ m/s temperatura este în intervalul 60-77 °C. Generarea suplimentară de căldură poate fi explicată prin frecarea particulelor intermediare de Zn, rulate în timpul contactului (Fig. 5.17).

5.7. Analiza rezultatelor experimentale prin hărți ale parametrilor tribologici

5.7.1. Utilizarea hărților în analiza parametrilor tribologici

Hărțile din acest studiu au fost realizate în Mathlab R2016a, folosind o interpolare de tip spline, iar suprafețele sunt „obligate” să includă datele experimentale. Un punct pe o hartă de uzură reprezintă o încercare pentru același set de parametri.

În acest studiu s-au realizat hărți ale coeficientului de frecare (ca valoare medie a celor două teste executate cu aceiași parametri), hărți ale ratei de uzură a diametrului urmei de uzură în aceleași condiții și hărți pentru temperatura din baia de ulei. Acestea au fost utile în evaluarea tendințelor și determinarea regimurilor de testare.

5.7.2. Analiza coeficientului de frecare

Pe o astfel de hartă de uzură, pot ieși în evidență relațiile dintre diferitele mecanisme dominante de uzură, care se observă că apar în diferite condiții.

La aditivarea cu ZnO (Fig. 5.18), se observă că la viteza $v=0,38$ m/s COF nu are o tendință clară de dependență față de sarcină și concentrația nano aditivului.

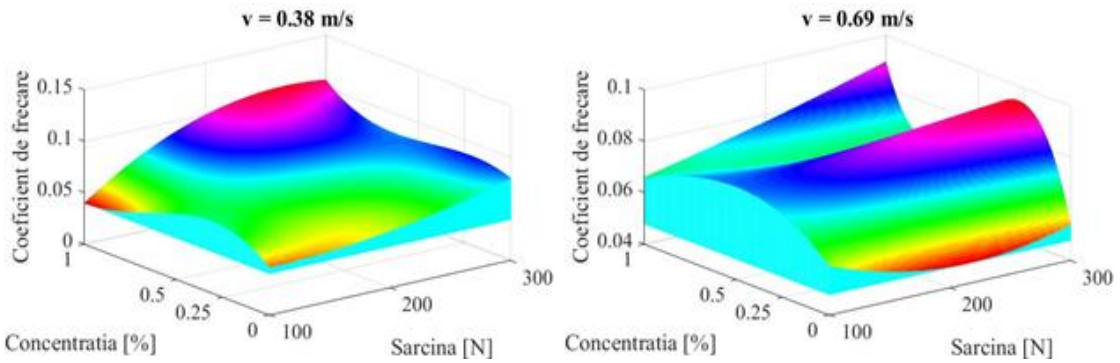


Fig. 5.18. Hărți ale coeficientului de frecare în funcție de regimul de testare și concentrația de ZnO pentru uleiul de rapiță neaditivat și nanoaditiv ZnO

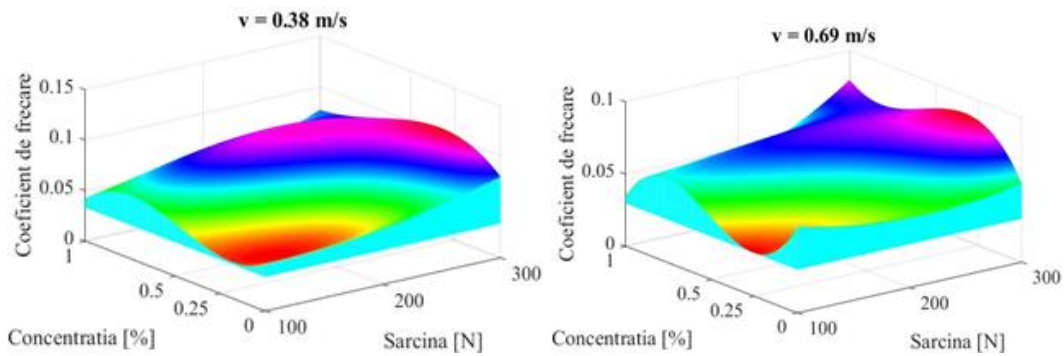
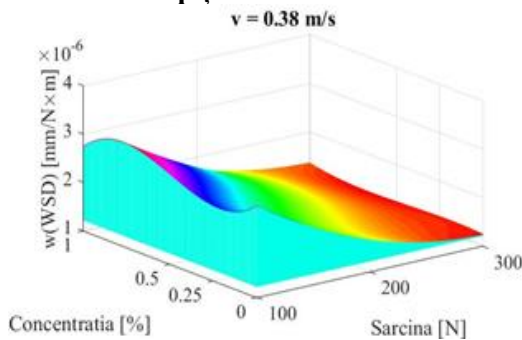


Fig. 5.19. Hărți ale coeficientului de frecare în funcție de regimul de testare și concentrația de TiO₂, pentru uleiul de rapiță neaditivat și nanoaditiv TiO₂

La aditivarea cu TiO₂ coeficientul de frecare este mai mare la viteza de 0,69 m/s și forța F=300 N, acesta depășind valoarea de 0,1 (Fig. 5.19).

5.7.3. Analiza parametrilor de uzură ulei de rapiță aditivat cu ZnO



ulei de rapiță aditivat cu TiO₂

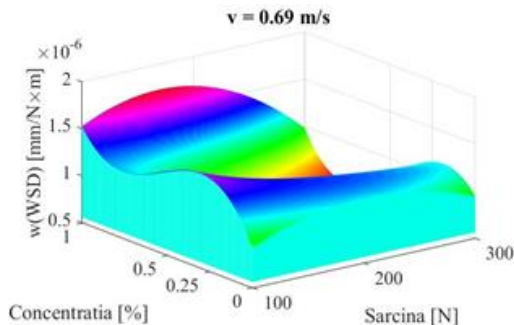
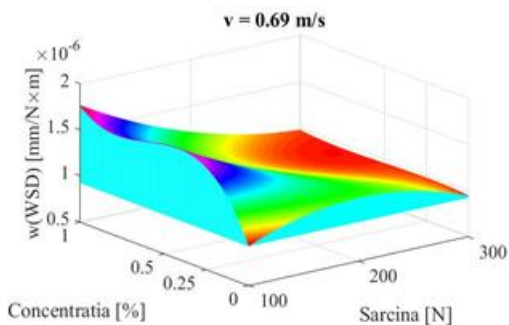
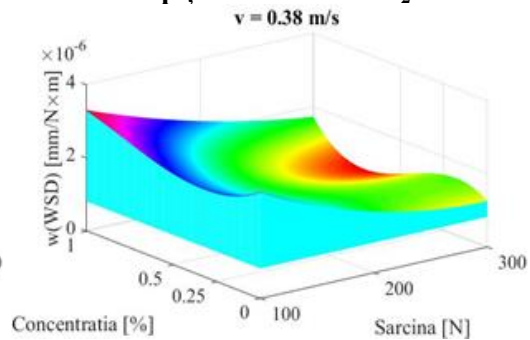


Fig. 5.20. Hărți ale ratei de uzură a WSD pentru uleiul de rapiță aditivat cu TiO₂ și ZnO

Influența calității aditivului se manifestă nu prin valoarea minimă, ci prin aria domeniului hărții pentru care se obțin valori minime ale $w(WSD)$.

Figura 5.20 prezintă hărți ale $w(WSD)$ pentru fiecare viteză testată. Se observă că, indiferent de natura aditivului, la concentrația de 1% și regimul cel mai puțin sever ($F=100$ N, $v=0,38$ m/s) s-au obținut cele mai mari valori ale parametrului de uzură. Ar rezulta că la sarcini mici, nanoaditivul nu este presat și menținut pe profilul contactului, în acest caz el favorizând creșterea uzurii prin alternarea zonelor în contact direct și prin stânjenirea circulației fluidului (aici și cu scop de răcire a contactului).

5.7.4. Analiza temperaturii în baia de ulei

Figura 5.21 prezintă hărți ale temperaturii în baia de ulei pentru uleiul de rapiță neaditivat și aditivat cu TiO_2 și ZnO . Din hărțile realizate se observă existența unui maxim pentru ambii aditivi la forța $F=300$ N și concentrație de aditiv de 1%.

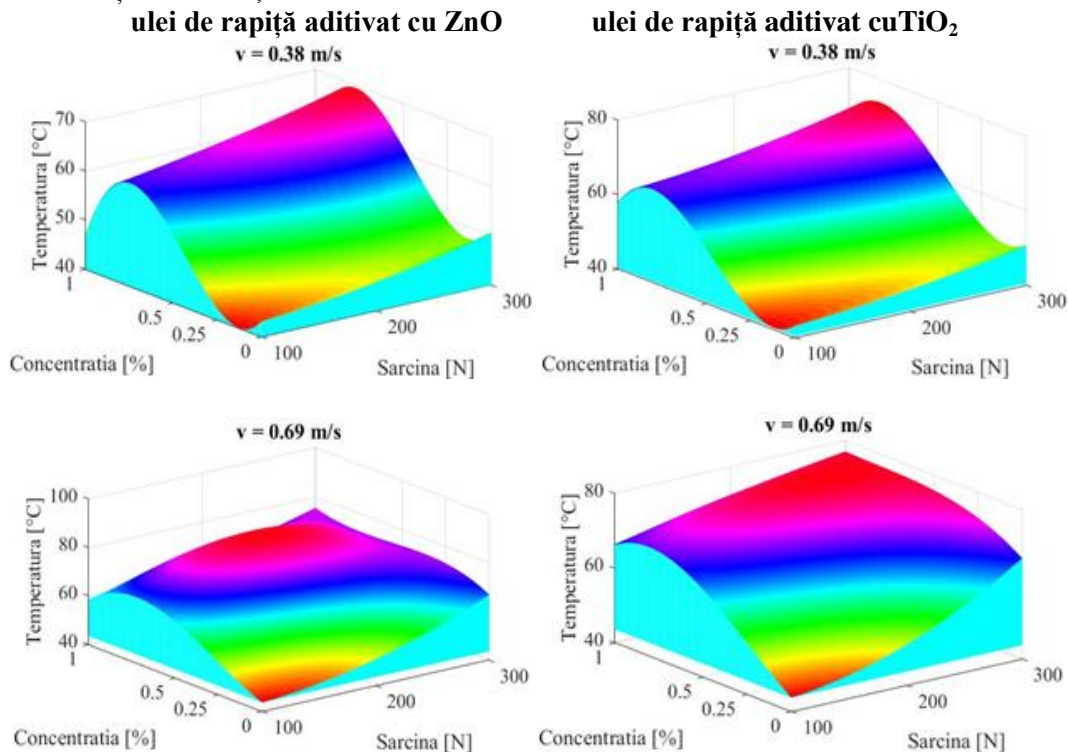


Fig. 5.21. Hărți ale temperaturii din baia de ulei pentru uleiul de rapiță neaditivat și aditivat cu ZnO și TiO_2

Valorile cele mai mari ale temperaturii s-au obținut pentru uleiul de rapiță neaditivat.

În concluzie, aditivarea testată de autor a crescut temperatura uleiurilor aditate față de uleiul de rapiță, în orice regim, dar creșterea nu se duce spre zona de oxidare a uleiului de rapiță (~ 140 °C).

5.8. Teste efectuate în regim sever (la gripare)

5.8.1. Parametrii de încercare pentru lubrifianții testați în regim sever

În cazul regimului sever, uzura și frecarea sunt influențate de unele proprietăți ale straturilor limită formate pe suprafața materialelor. Aceste straturi continue blochează contactul dintre elemente.

Parametri de încercare pentru lubrifianții testați în regimul sever sunt următorii:

- forța de încărcare—de la 500 N, până la 900 N (creștere în trepte de 50 N),
- viteza de alunecare—0,53 m/s corespunzătoare turației de 1400 rpm,
- timpul de încercare—1 minut ($\pm 1\%$),
- concentrația de aditiv în lubrifianții formulați este de 0,25%, 0,50% și 1%(wt)

5.8.2. Coeficientul de frecare

În testele din regimul sever coeficientul de frecare atinge valori extreme care ne pot duce cu gândul la gripare.

La uleiul de rapiță (Fig. 5.22) se observă variații mari ale coeficientului de frecare până în secunda 15 a testului, după care valorile nu mai au variații mari. Acest lucru înseamnă că distrugerea suprafeței sau procesele bruște care apar la sarcini mari apar în prima perioadă a testului, nu spre final.

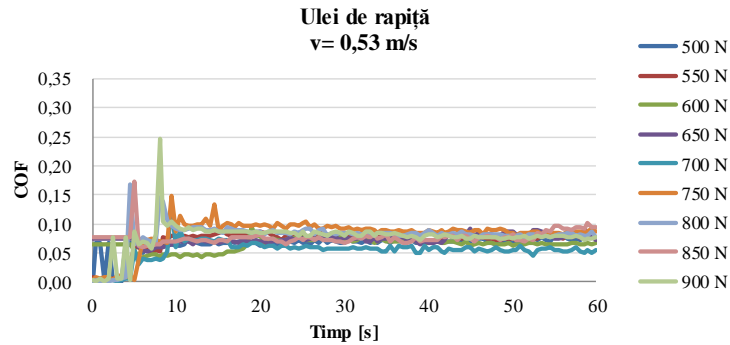


Fig. 5.22. Evoluția coeficientului de frecare pentru uleiul de rapiță neaditivat în regim sever

În Fig. 5.23 este dată evoluția coeficientului de frecare în cazul uleiului de rapiță aditivat cu 1% TiO_2 , în regim sever. Se observă o creștere a coeficientului de frecare și o zădărire a acestuia în primele 10-15 secunde, dar și restul valorilor variază destul de mult.

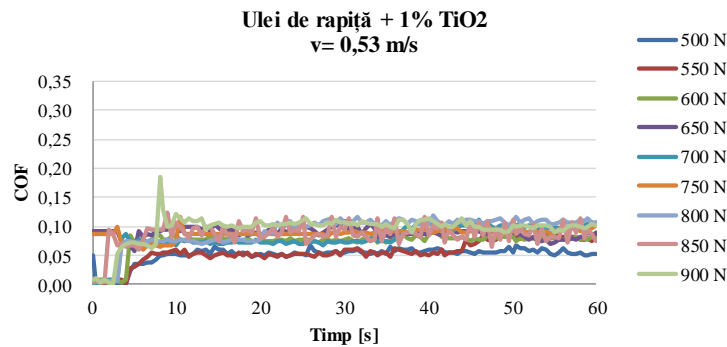


Fig. 5.23. Evoluția coeficientului de frecare pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% TiO_2 , în regim sever

În Fig. 5.24 este arătată evoluția coeficientului de frecare, pentru teste în regim sever, pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% ZnO .

COF are valori foarte mari la începutul testului, după care se duce spre valoarea de 0,1, ceea ce înseamnă un regim de frecare mixtă. Înseamnă că la începutul testului au loc schimbări majore (deformații plastice și uzură abrazivă) care generează urme de uzură mari. Oscilațiile COF se duc până pe la 30 s.

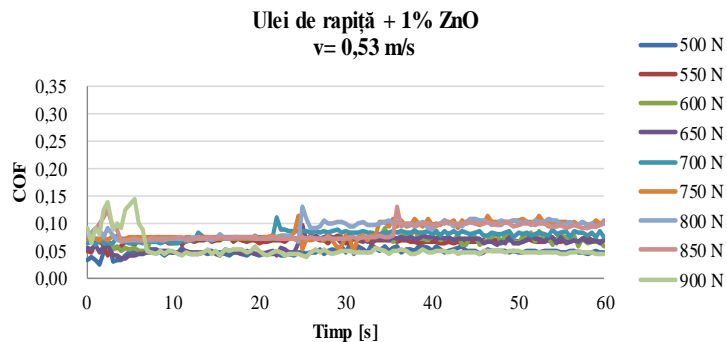


Fig. 5.24. Evoluția coeficientului de frecare pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% ZnO , în regim sever

În Fig. 5.25 sunt date valorile coeficienților de frecare medii pentru uleiul de rapiță neaditivat și aditivat cu nanoparticule de TiO_2 și ZnO .

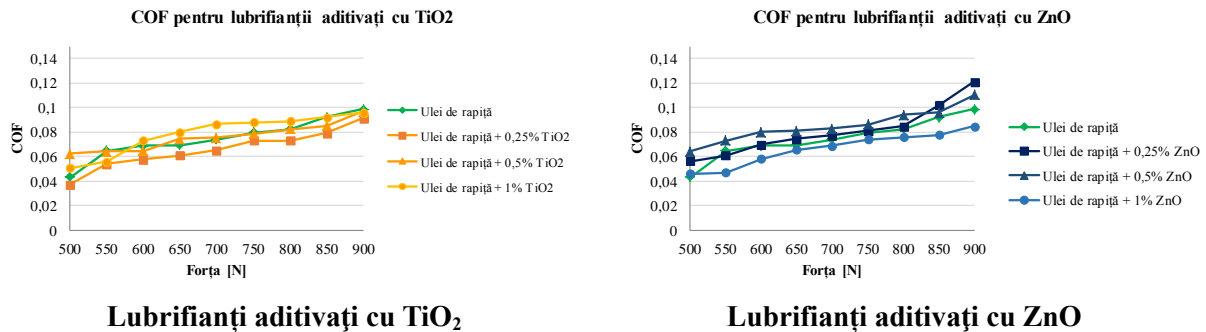


Fig. 5.25. Coeficienții de frecare medii pentru uleiul de rapiță aditivat cu TiO_2 și ZnO în regim sever

Pentru lubrifianții aditivați cu TiO_2 , graficul a avut drept scop compararea valorilor COF. Din reprezentare nu s-a obținut un rezultat concludent, în sensul că nu se poate determina care dintre acești coeficienți de frecare este mai bun, pentru că valorile se îngheșuie până în valoarea de 0,1, ca medie.

În cazul uleiului de rapiță aditivat cu ZnO , valori mai mari ale COF au fost obținute pentru uleiurile aditate cu 0,25% și 0,5% aditiv. În regimul sever media coeficienților de frecare nu reflectă procesele de distrugere de pe bilele testate.

5.8.3. Diametrul urmei de uzură (WSD)

Curba sarcină-uzură este foarte importantă pentru testele efectuate în regim sever deoarece forma curbei și valorile WSD relevă dacă comportamentul lubrifianțului este adecvat.

În Fig. 5.26 sunt prezentate valorile medii ale diametrului urmei de uzură pentru uleiul de rapiță neaditivat și aditivat cu nanoparticule de TiO_2 și ZnO .

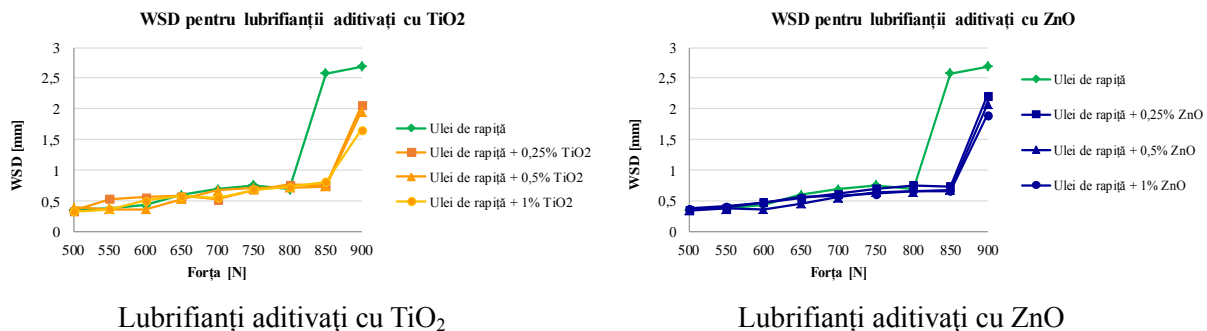


Fig. 5.26. WSD pentru uleiul de rapiță neaditivat și aditivat cu TiO_2 și ZnO în regim sever

Se observă valori foarte mari (~3mm.) pentru uleiul de rapiță neaditivat și pentru uleiul de rapiță aditivat cu 0,5% TiO_2 . Pentru concentrația de aditiv de 0,25% și 1%, valorile WSD sunt mult mai mici, ajungând aproape de 2 mm pentru lubrifianțul aditivat cu 0,25% TiO_2 . Cea mai bună comportare a avut-o uleiul de rapiță aditivat cu 1% nanoparticule de TiO_2 .

Pentru uleiul de rapiță neaditivat, cât și pentru cel aditivat cu nanoparticule de ZnO . La 500 N și 550 N valorile WSD sunt aproape identice, ceea ce înseamnă că lubrifianții testați la aceste sarcini au un comportament similar cu cel din regimul normal de lucru. De la 550 N până la 800 N (inclusiv) toți lubrifianții testați au urmat o curbă similară cu linii de înclinare ușor mai mari. Începând cu 850 N curba devine diferită, panta mai mare obținându-se pentru uleiul de rapiță neaditivat. Lubrifianțul cu o concentrație mai mare de aditiv (1% ZnO) continuă tendința anterioară, ceea ce înseamnă că lubrifianțul poate suporta sarcini mult mai mari decât ceilalți lubrifianți. Între 850 N și 900 N panta fiecărui lubrifianț este diferită. Cel mai bun comportament tribologic îl are lubrifianțul cu 1% ZnO .

În Fig. 5.27 sunt date imagini cu urmele de uzură, măsurate la microscopul optic, pentru uleiul de rapiță neaditivat și aditivat cu 1% TiO_2 și 1% ZnO în regimul sever de lucru, pentru forțele de 800 N și 900 N.

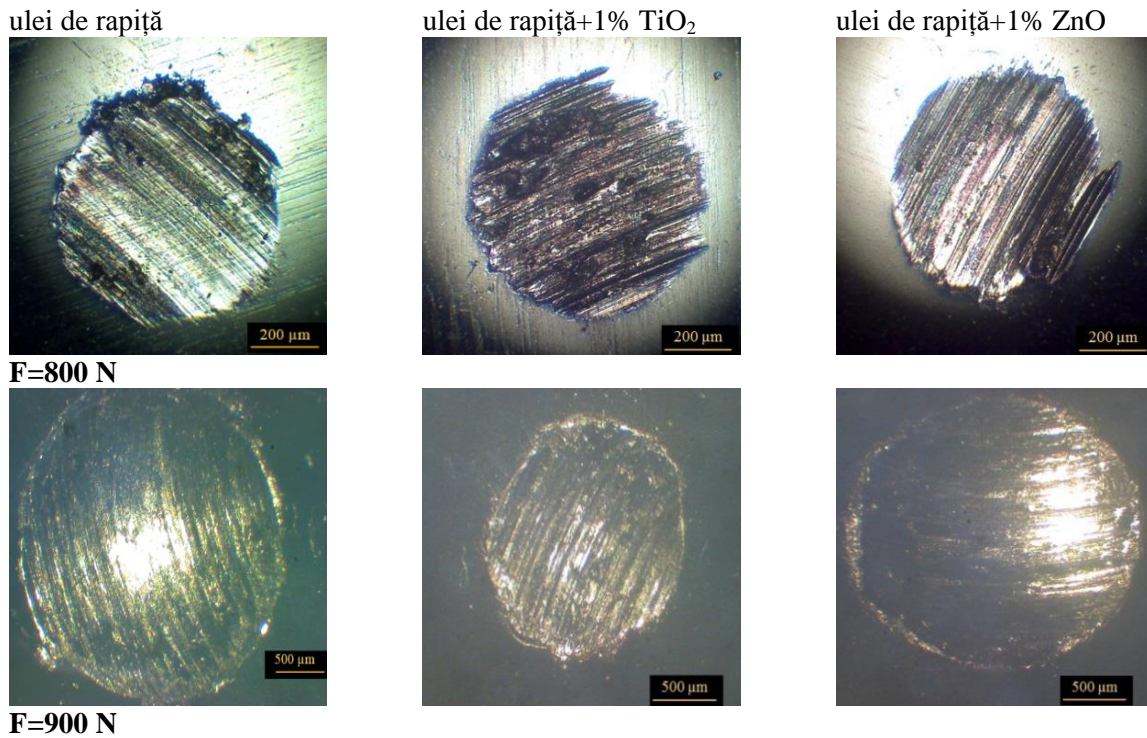


Fig. 5.27. Urme de uzură măsurate la microscopul optic

5.8.4. Temperatura în baia de ulei

Temperatura uleiului de rapiță neaditivat și aditivat cu nanoparticule de TiO_2 și ZnO , în baia de ulei, a fost analizată în Fig. 5.28.

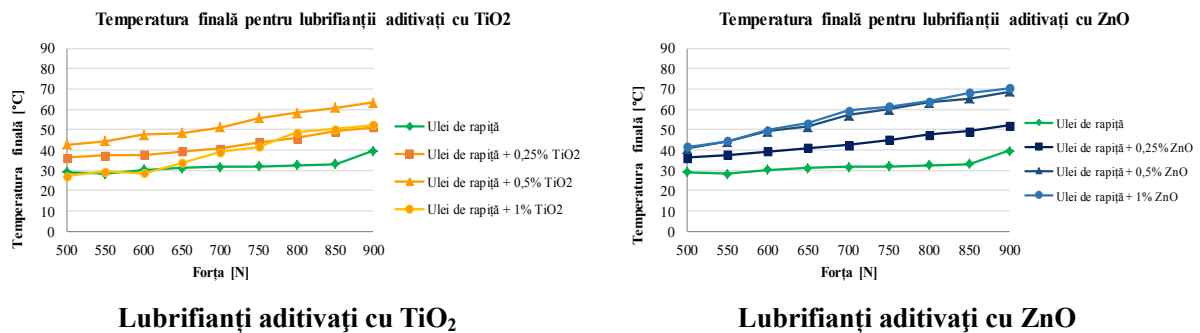


Fig. 5.28. Evoluția temperaturii din baia de ulei, pentru uleiul de rapiță neaditivat și nanoaditivi TiO_2 și ZnO , în regimul sever

După cum se poate observa, cele mai mici valori ale temperaturii obținute la finalul testului de 1 minut, în regimul sever, o are uleiul de rapiță neaditivat (între $30\text{ }^\circ\text{C}$ - $40\text{ }^\circ\text{C}$).

În cazul aditivării uleiului de rapiță cu nanoaditiv TiO_2 , cea mai mare temperatură la finalul testului a fost înregistrată pentru uleiul de rapiță aditivat cu 0,5% TiO_2 (a depășit $60\text{ }^\circ\text{C}$).

Aditivând uleiul de rapiță cu ZnO se observă o creștere a temperaturii pentru lubrifianții aditivați cu 0,5% și 1% nanoparticule de ZnO . Trebuie luat în considerare faptul că, în cazul sarcinilor mari, chiar și accidental, temperatura va crește, iar sistemul de răcire al dispozitivului trebuie să mențină temperatura sub valoarea temperaturii de oxidare a uleiurilor vegetale ($\sim 140\text{ }^\circ\text{C}$).

Generarea suplimentară de căldură ar putea fi explicată prin fenomenul de frecare al particulelor intermediare de ZnO , care se rostogolesc în contact.

5.9. Concluzii la testele în regim sever

Cercetările s-au orientat spre studiu tribologic al uleiului de rapiță neaditivat și aditivat cu ZnO și TiO₂.

La viteze mari de alunecare, pentru uleiul de rapiță neaditivat, se observă formarea unei pelicule. Coeficientul de frecare al uleiului de rapiță este mai puțin sensibil la sarcină la viteze mari.

Se observă că uleiul de rapiță aditivat cu 1% ZnO și cu 1% TiO₂ nu a îmbunătățit valoarea coeficientului de frecare, dar aditivarea uleiului de rapiță a fost eficientă în reducerea frecării și uzurii.

Capitolul 6

Analiza parametrilor de rugozitate pentru urmele de uzură obținute la lubrifiere cu ulei de rapiță cu nanoaditivi pe mașina cu patru bile

6.1. Parametri 2 D și 3 D

Din literatura de specialitate existentă și studiată, există o serie de lucrări științifice referitoare la studiul calității suprafețelor uzate [73], [71], [19], [20], [31], [62], [50], [65], [74] din care se pot contura direcții de cercetare și anume:

- trebuie să se facă o comparație între parametrii 2D/3D obținuți folosind o metodă pentru eșantionarea parametrilor 2D și a zonelor studiate pentru parametrii 3D,
- studiul și testele trebuie să facă o corelație între evoluția parametrilor texturii și parametrii funcționali,
- studiul ar trebui făcut pentru ambele suprafețe ale triboelementelor.

Parametri de amplitudine

Abaterea medie aritmetică a suprafeței, S_a , respectiv a profilului, R_a [μm]

$$S_a = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |z(x_i, y_j)| \quad (6.1)$$

$$R_a = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |z(x_i)| \quad (6.2)$$

unde $z(x_i)$ reprezintă înălțimea unui profil măsurat într-o anumită poziție.

Abaterea medie aritmetică a profilului, R_a respectiv a suprafeței, S_a , este parametrul utilizat cel mai des în studiile profilometrice.

Înălțimea maximă a suprafeței / profilului, St/Rt [μm], reprezintă distanța dintre valoarea maximă a înălțimii suprafeței și valoarea maximă a adâncimii văii.

Dacă se analizează profile nefiltrate, față de o suprafață/linie de referință:

$$R_t = (|Rp| + |Rv|) \quad (6.3)$$

$$S_t = (|Sp| + |Sv|) \quad (6.4)$$

Parametri funcționali

În cadrul analizei bidimensionale acești parametri se pot defini din curba lungimii portante, iar în cadrul analizei tridimensionale, pot fi definiți de pe curba ariei portante. Curba pe care o descriu parametri funcționali se numește curba Abbott-Firestone și caracterizează portanța suprafeței.

Spk/Rpk reprezintă „zona înălțimilor reduse a vârfurilor”, Sk/Rk reprezintă „zona mediană” a texturii, iar Svk/Rvk reprezintă „valea” sau „zona unde se regăsește și este reținut lubrifianțul”.

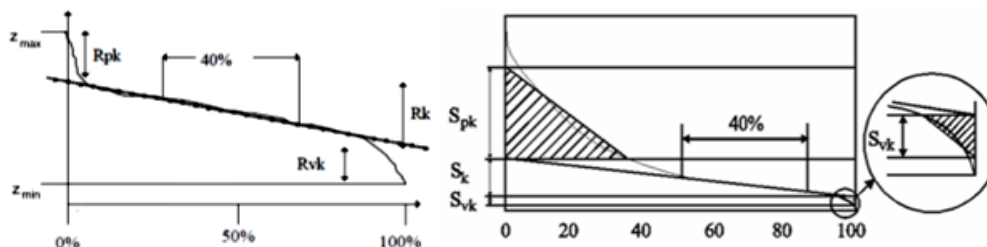


Fig. 6.1. Setul de parametri 2D/3D funcționali [92]

6.2. Metodologia de înregistrare a texturii urmelor de uzură

6.2.1. Metodologia de evaluare a texturii suprafeței

Din punct de vedere calitativ suprafața inițială a bilelor și a urmelor de uzură a fost evaluată cu un profilometru laser NANOFOCUS μSCAN , pus la dispoziție prin sprijinul Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava. Profilometrul poate măsura bidimensional și tridimensional, fără contact, topografia suprafețelor, având un interval de măsurare pe direcție verticală cuprins între 1 μm și 18 mm, cu o rezoluție de 25 nm. Rezultatele au fost prelucrate cu ajutorul softului Mountains 8.1 [92].

Parametrii 2D și 3D s-au înregistrat pentru fiecare urmă de uzură (ca suprafață) și s-a calculat media, maximul și minimul acestora. Distanța de măsurare între linii la măsurătorile 3D a fost de 5 μm iar pasul pe linie a fost tot de 5 μm.

S-au înregistrat coordonatele unei suprafețe, pentru fiecare bilă, de 1500 μm x 1500 μm, deoarece din măsurători, s-a constatat că WSD poate atinge valori de 1000 μm pentru regimurile mai severe de testare ($F=300\text{ N}$, $v=0,53\dots 0,69\text{ m/s}$).

Parametrii 3D au fost măsurați pentru toate valorile $z(x, y)$ pe suprafața WSD, considerată o elipsă.

În Fig. 6.2 este prezentată o urmă de uzură de pe bila 1 al unui test în care s-a testat uleiul de rapiță neaditivat la sarcina de 100 N și viteză de alunecare $v=0,69\text{ m/s}$. Urma a fost reconstruită folosind softul Mountains SPIP 8.1. Se observă urma de uzură care a fost decupată din imaginea înregistrată inițial, elipsa urmei fiind conformă cu măsurătorile făcute la microscopul optic.

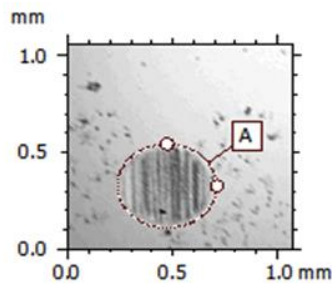


Fig. 6.2. Selectarea WSD sub formă de elipsă. Un exemplu luat de pe bila numărul 1 a cărei urmă de uzură a rezultat după 1 h de testare, lubrifianț ulei de rapiță (neaditivat), $F=100\text{ N}$ și $v=0,69\text{ m/s}$

Pentru fiecare urmă, pentru măsurarea și calculul parametrilor se urmează pașii descriși în continuare, în diagrama din Fig. 6.3.

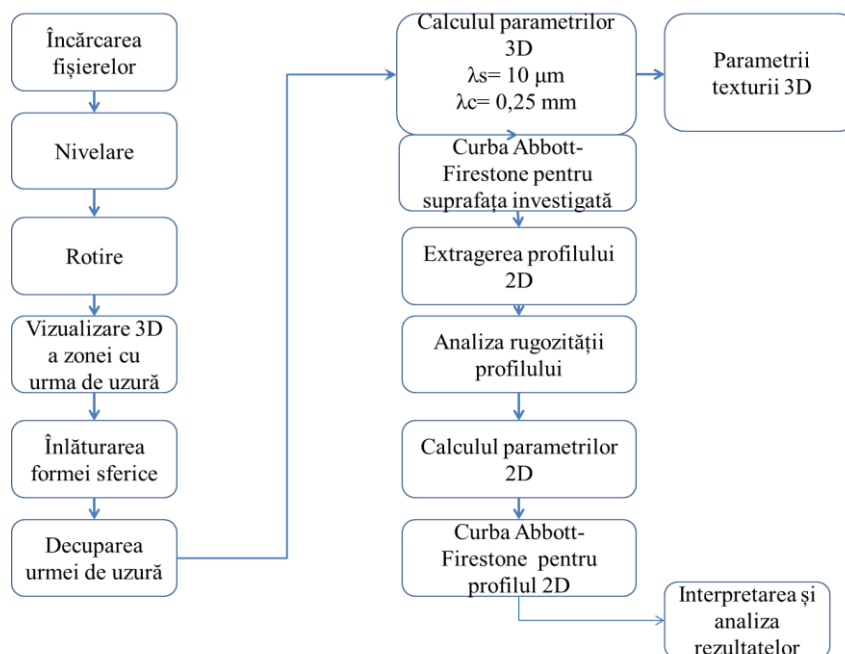


Fig. 6.3. Schemă pentru măsurarea și calcularea parametrilor de rugozitate folosind softul Mountains SPIP 8.1.

Valorile parametrilor depind de filtrele aplicate. Pentru acest studiu s-au păstrat următoarele filtre: $\lambda_s=10\text{ }\mu\text{m}$ și $\lambda_c=0,25\text{ mm}$ [93], [94].

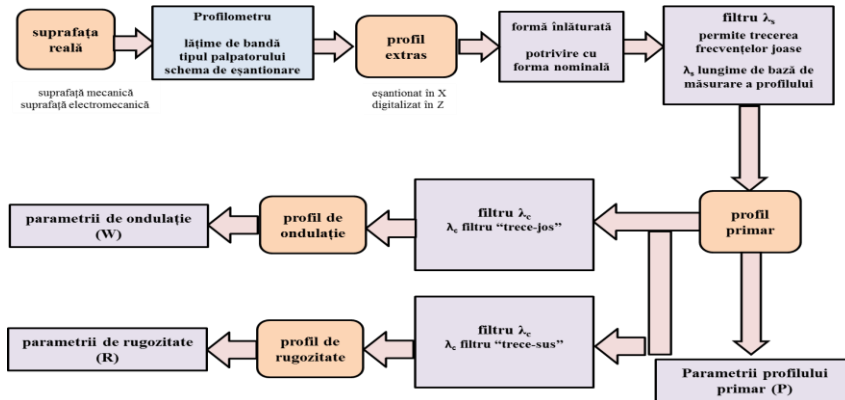


Fig. 6.4. Schema de măsurare pe un profilometru optic. Adaptată după [10]

6.3. Studiul texturii suprafețelor uzate ale bilelor cu ajutorul profilometriei 3D

6.3.1. Analiza parametrilor 3D pentru suprafețele neuzate ale bilelor

Figura 6.5 prezintă o imagine reconstruită (virtuală) cu programul Mountains SPIP 8.1 a zonei investigate cu ajutorul profilometrului non-contact.

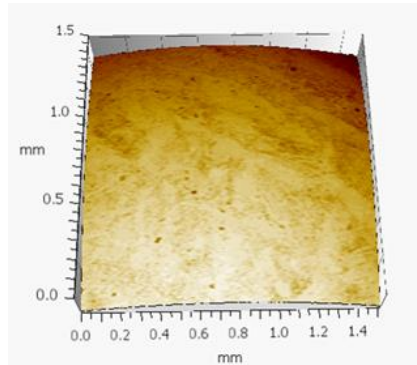


Fig. 6.5. Imagine virtuală a suprafeței inițiale a bilei

În Tabelul 6.1 sunt date valori caracteristice ale parametrilor de rugozitate pentru suprafața bilei neuzate, măsurate la profilometrul laser.

Tabel 6.1. Valori caracteristice ale parametrilor de rugozitate pentru suprafața neuzată a bilei

	2 μm	5 μm	20 μm
Sa [μm]	0,1938	0,206	0,2261
Sq [μm]	0,2984	0,313	0,3188
Ssk	0,3077	-0,203	0,3124
Sku	12,58	19,17	6,359
Sv [μm]	3,617	6,027	1,351
St [μm]	8,334	10,03	3,314
Sp [μm]	4,717	4,001	1,963
Spk [μm]	0,4733	0,474	0,4863
Sk [μm]	0,4193	0,484	0,5795
Svk [μm]	0,4604	0,486	0,4180

Analizând informațiile din Fig. 6.5 și Tabelul 6.1, se poate caracteriza textura suprafeței bilelor după:

- rarele asperități foarte înalte ($St=10,03 \mu\text{m}$),
- suprafața fin rectificată ($Sa=0,206 \mu\text{m}$),

- platoul cu denivelări ($S_{sk}=-0,203$, $S_{ku}=19,17$).

Curba Abbott-Firestone (Fig. 6.6) este des utilizată pentru a evalua comportarea unei suprafețe cu un anumit grad de rugozitate sub o forță și pentru a evalua „blocarea” unei cantități de lubrifianț în văile texturii [11], [21].

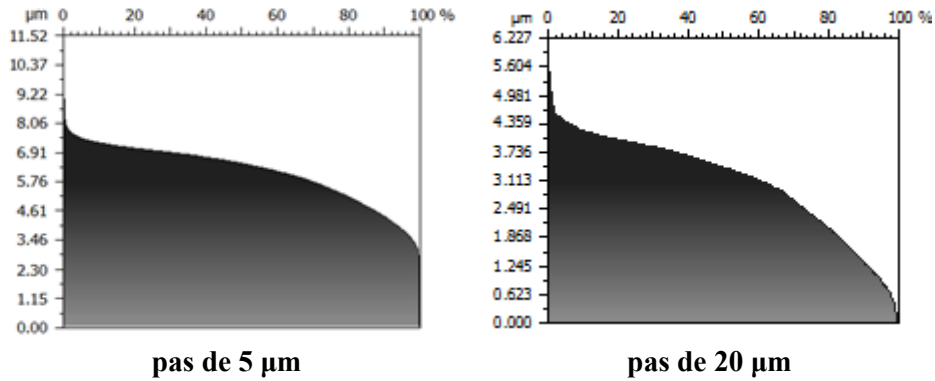


Fig. 6.6. Curba Abbott-Firestone pentru profilul bilei neuzate

Analizând forma și valorile caracteristice ale curbei Abbott-Firestone, se observă o diferență foarte mare între scanarea cu pas de 20 μm și cea cu pas mai mic, 5 μm .

6.4. Analiza parametrilor 3D pentru suprafețele uzate ale bilelor în regim normal și regim sever de lucru

6.4.1. Regimul normal de lucru

Parametri de amplitudine

Abateră medie aritmetică a texturii suprafeței, S_a [μm]

În Fig. 6.7 este prezentat parametrul S_a după testare cu ulei de rapiță neaditivat și aditivat cu TiO_2 și ZnO , la forțele de 100 N, 200 N și 300 N și viteză de alunecare 0,38 m/s și 0,69 m/s.

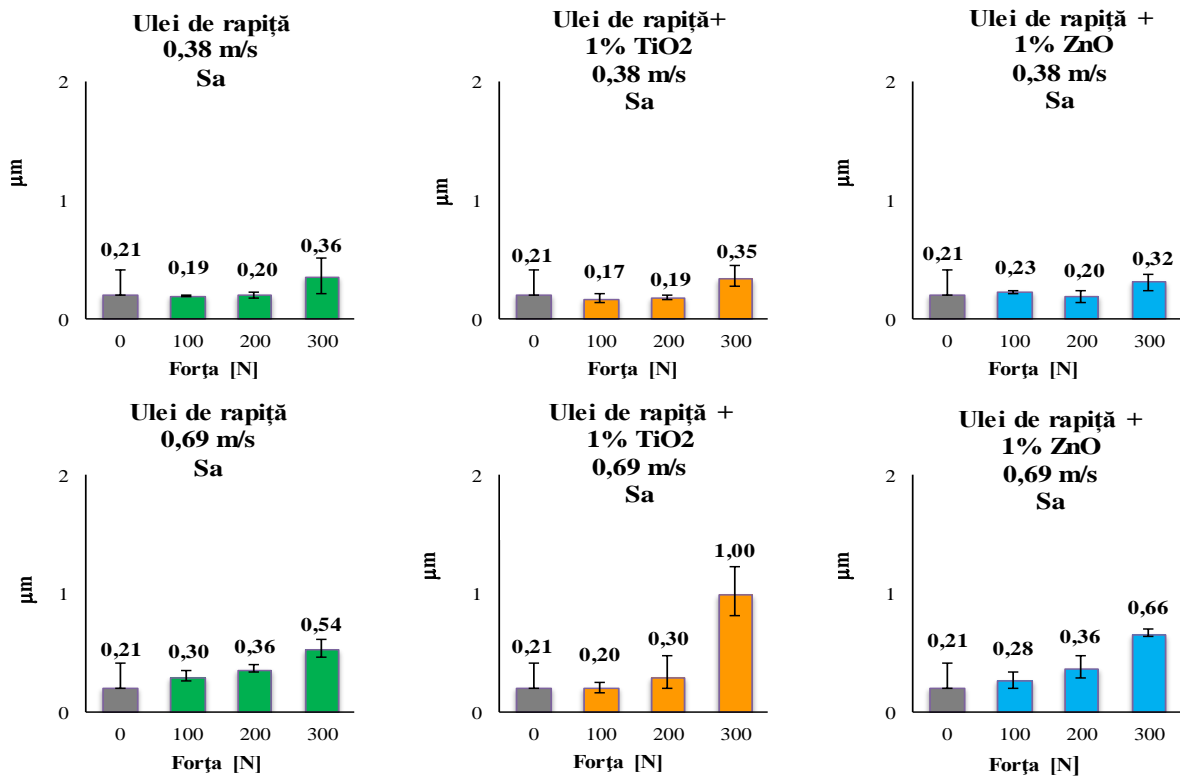


Fig. 6.7. Evoluția parametrului S_a în regim normal

Valorile medii ale parametrului Sa par să fie liniar dependente cu sarcina. La viteza mai mică, degradarea suprafeței bilei evoluează după o pantă mai mică pentru trecerea de la $F=100$ N la $F=200$ N. Se observă o ușoară creștere a lui Sa pentru fiecare forță și la oricare dintre vitezele de alunecare. La $v=0,38$ m/s, pentru uleiul de rapiță neaditivat și pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% TiO_2 , se observă o ușoară scădere datorită rodajului foarte fin (se duc doar vârfulurile asperităților). Pentru celelalte viteze și forțe, rugozitatea medie crește ușor, iar suprafețele încă ar putea fi utilizate.

Înălțimea maximă a suprafeței, St [μm]

Figura 6.8 prezintă evoluția înălțimii maxime a suprafeței (St). La forțele cele mai mici (100 N și 200 N) valorile lui St, în cazul aditivării uleiului de rapiță, sunt mai scăzute comparativ cu valorile obținute la $F=300$ N pentru toate vitezele de alunecare analizate, unde s-au obținut valori mult mai mari.

St este un parametru important în tribologie, mai ales în tribologia contactelor lubrificate, pentru că înălțimile mari ale asperităților, chiar dacă foarte rare, produc distrugerea peliculei de lubrifiant și pot schimba regimul de la un regim EHD la un regim limită, ceea ce duce la o creștere bruscă a coeficientului de frecare.

Sa nu oferă informații despre structura spațială și nu face diferența între văile și vârfulurile texturii suprafeței. Malburg [55] a apreciat calitatea suprafeței și prin raportul, definit ca:

$$\xi_{(Sa,St)} = \frac{St}{Sa} \quad (6.5)$$

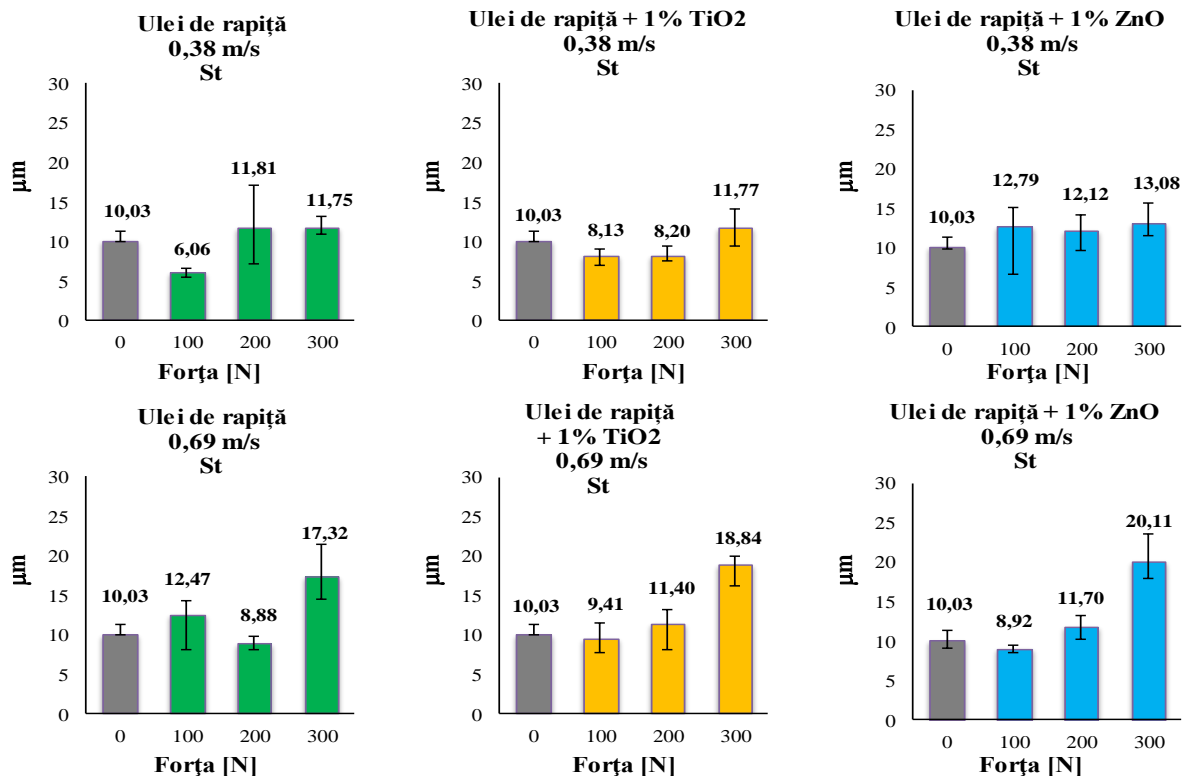


Fig. 6.8. Evoluția parametrului St în regim normal

În această lucrare, autorul a considerat că acest raport trebuie luat în considerare și la studiul suprafețelor uzate. În cazul acestora, o valoare mică a raportului menționat poate indica o calitate bună a suprafeței uzate, deja utilizate, și o continuare a funcționării tribosistemului în condiții bune. O valoare mare poate caracteriza o suprafață cu vârfuluri și/sau văi (rare sau nu), dar foarte înalte, ceea ce presupune un proces agresiv de uzare, cel puțin în zona existenței maximumului singular al înălțimilor asperităților.

În Tabelul 6.2 sunt date valorile parametrilor Sa, St și raportul acestor parametri St/Sa, pentru uleiul de rapiță neaditivat și aditivat cu 1% TiO_2 și 1% ZnO pentru toate sarcinile aplicate la vitezele de alunecare de 0,38 m/s și 0,69 m/s.

Tabelul 6.2. Valori ale parametrilor St, Sa și ale raportului St/Sa

	0,38 m/s			0,69 m/s		
	100 N	200 N	300 N	100 N	200 N	300 N
St	6,06	11,81	11,75	12,47	8,88	17,32
Sa	0,19	0,2	0,36	0,3	0,36	0,54
$\xi_{(Sa,St)}$	31,89	59,05	32,63	41,56	24,66	32,07
	0,38 m/s			0,69 m/s		
	100 N	200 N	300 N	100 N	200 N	300 N
St	8,13	8,2	11,77	9,41	11,4	18,84
Sa	0,17	0,19	0,35	0,2	0,3	1
$\xi_{(Sa,St)}$	47,82	43,15	33,62	47,05	38	18,84
	0,38 m/s			0,69 m/s		
	100 N	200 N	300 N	100 N	200 N	300 N
St	12,79	12,12	13,08	8,92	11,7	20,11
Sa	0,23	0,2	0,32	0,28	0,36	0,66
$\xi_{(Sa,St)}$	55,6	60,6	40,87	31,85	32,5	30,46

Analizând Fig. 6.9 pentru ξ , se observă o tendință de scădere a parametrului pentru viteza cea mai mare, dar valorile nu pot fi încadrate clar într-o relație dependentă de viteză și sarcină.

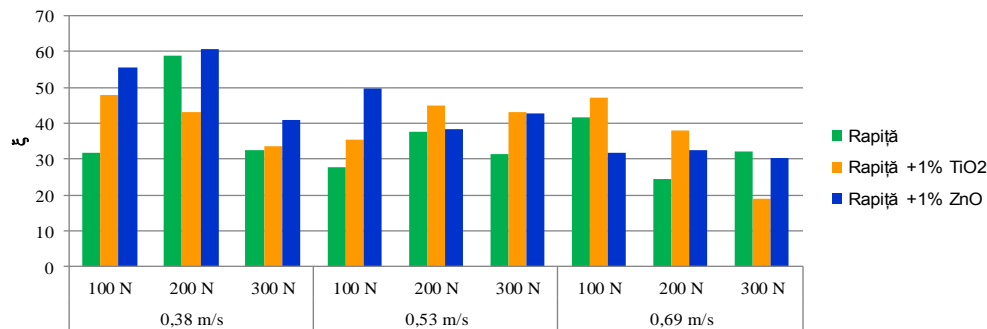


Fig. 6.9. Evoluția parametrului $\xi_{(Sa,St)}$

Pentru bila neuzată s-a calculat valoarea parametrului ξ :

$$\xi_{(Sa,St)} = St / Sa = 10,03 / 0,206 = 48,68 \quad (6.6)$$

Analiza parametrilor funcționali 3D în regimul normal de lucru

În Fig. 6.10, parametri funcționali analizați sunt reprezentați ca suma $Svk+Sk+Spk$. În grafice, valoarea 0 reprezintă suprafața inițială, neuzată, a bilei.

Analiza acestor parametri este importantă pentru că indică modul cum evoluează componentele texturii (zona de vârf care este și zona de uzură ușoară, zona miezului sau de rezistență și zona care influențează rezerva de lubrifiant a contactului).

Creșterea Spk indică o uzură abrazivă, observabilă și pe fotografii, scăderea lui Sk înseamnă scăderea rezistenței stratului texturii iar creșterea lui Svk arată că uzura s-a extins până în partea de jos a texturii.

La lubrifierea cu ulei de rapiță se observă o creștere liniară a sumei parametrilor funcționali cu pantă mai mare spre viteza mai mare.

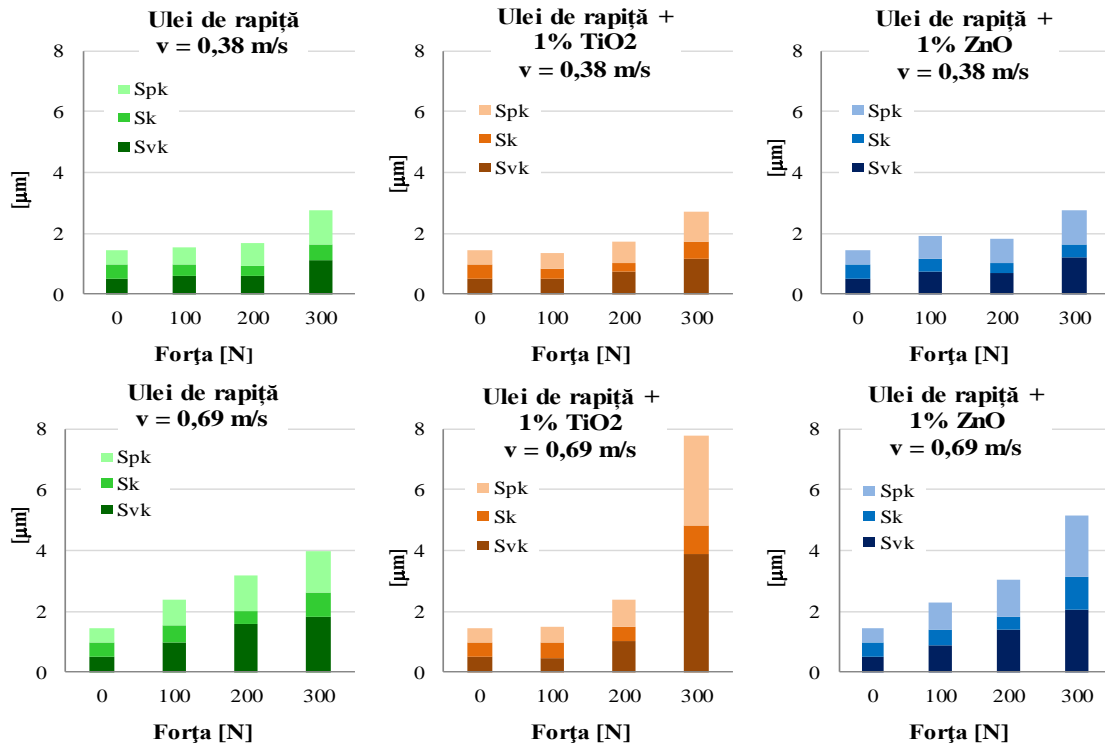


Fig. 6.10. Suma parametrilor funcționali (Spk+Sk+Svk) în regim normal

O evoluție similară o are și uleiul de rapiță aditivat cu 1% TiO₂, dar modificările mari ale parametrilor funcționali se observă doar la F=300 N, ceea ce înseamnă că pentru celelalte sarcini aditivul favorizează menținerea texturii și chiar finisarea ei pentru că suma parametrilor funcționali nu crește mult față de valoarea inițială. Se observă o schimbare dramatică numai pentru regimul extrem (F=300, v=0,69 m/s) ceea ce presupune un regim mai sever de uzură (abrazivă, dar posibil și de adeziune).

Pentru lubrifianțul ulei de rapiță neaditivat și aditivat cu 1% ZnO, suma parametrilor funcționali are o creștere proporțională cu sarcina, dar nu abrupt, creșterea este proporțională pe toate segmentele, ceea ce ar reflecta o uzură fără schimbare de proces (nu apare uzura adezivă).

6.4.2. Regimul sever de testare

Din documentația făcută, analiza parametrilor de rugozitate pentru regimul sever este o idee originală care poate fi valorificată în sensul delimitării mai clare și pe criteriul calității suprafeței a regimului de lucru acceptat de tribosistem (bilele + lubrifianțul + regimul de lucru).

Parametri de amplitudine 3D

Abaterea medie aritmetică a texturii suprafeței, Sa [μm]

În Fig. 6.11 este prezentată evoluția parametrului Sa în regimul sever de lucru. Parametrul Sa exprimă, ca valoare absolută, diferența de înălțime a fiecărui punct comparativ cu media aritmetică a suprafeței. Acest parametru este utilizat în general pentru a evalua rugozitatea suprafeței.

Tendința de creștere a rugozității în regimul sever este mai mică pentru uleiul de rapiță până la sarcina de 900 N.

Pentru lubrifianții aditivați există aceeași tendință dar cu o pantă ceva mai accentuată, iar pentru sarcina de 900 N abaterea medie aritmetică a texturii suprafeței crește brusc.

Din punct de vedere al calității suprafeței regimul sever nu se instalează la uleiul de rapiță neaditivat nici la 900 N, dar urmele de uzură cresc foarte mult.

La lubrifianții aditivați calitatea suprafeței se schimbă mult. Valoarea parametrului Sa crește foarte mult la sarcina de 900 N.

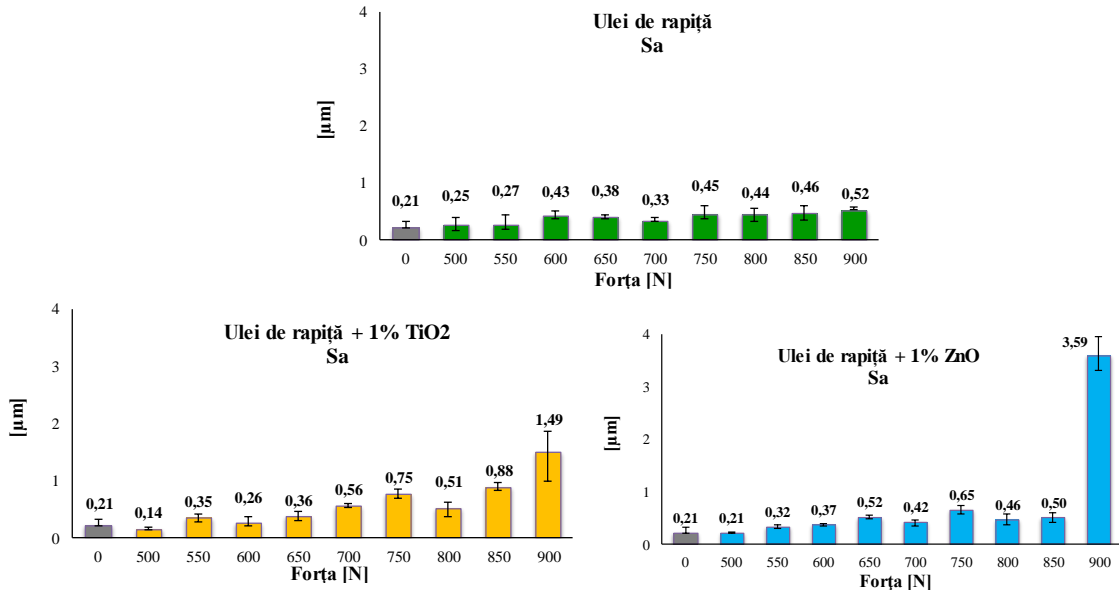


Fig. 6.11. Evoluția parametrului Sa în regimul sever de lucru

În Fig. 6.12 sunt date imagini ale urmelor de uzură la microscopul optic, pentru bilele testate în regim sever. Forțele aplicate au fost de 850 N și 900 N, iar viteza de alunecare a fost de 0,53 m/s.

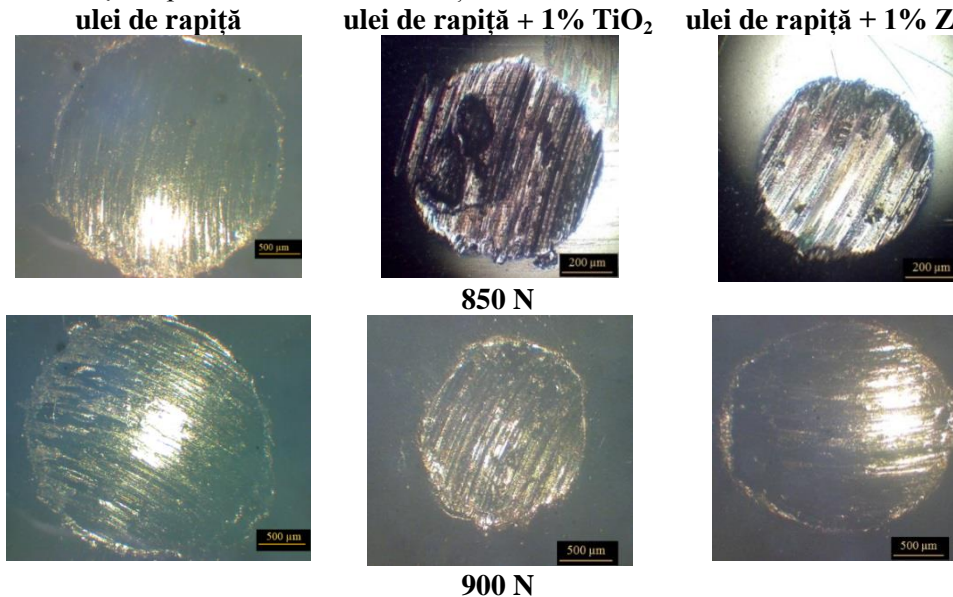


Fig. 6.12. Urme de uzură măsurate la microscopul optic, pentru bile testate

Înălțimea maximă a suprafeței, St [μm]

Parametrul de amplitudine St prezentat în Fig. 6.13 trebuie utilizat cu atenție, deoarece este destul de sensibil la vârfurile și văile izolate prezente pe o suprafață. Cu toate acestea înălțimea maximă a suprafeței poate da valori bune în cazul în care suprafața a fost filtrată.

Privind evoluția parametrului St se poate observa creșterea acestuia odată cu creșterea sarcinii pentru toți lubrifianții testați. La uleiul de rapiță neaditivat valorile lui St sunt cele mai scăzute. Valorile încep să crească la testarea uleiului de rapiță aditivat cu 1% TiO₂, ajungând la valoarea de 41,21 μm, în timp ce testând uleiul de rapiță aditivat cu 1% ZnO obținem cele mai mari valori comparând lubrifianții testați. În acest caz, valoarea parametrului St atinge valoarea de 51,3 μm la sarcina de 900 N.

Suprafața nu seamănă cu o suprafață strunjită, ci mai degrabă cu o suprafață rectificată cu vârfuri mari.

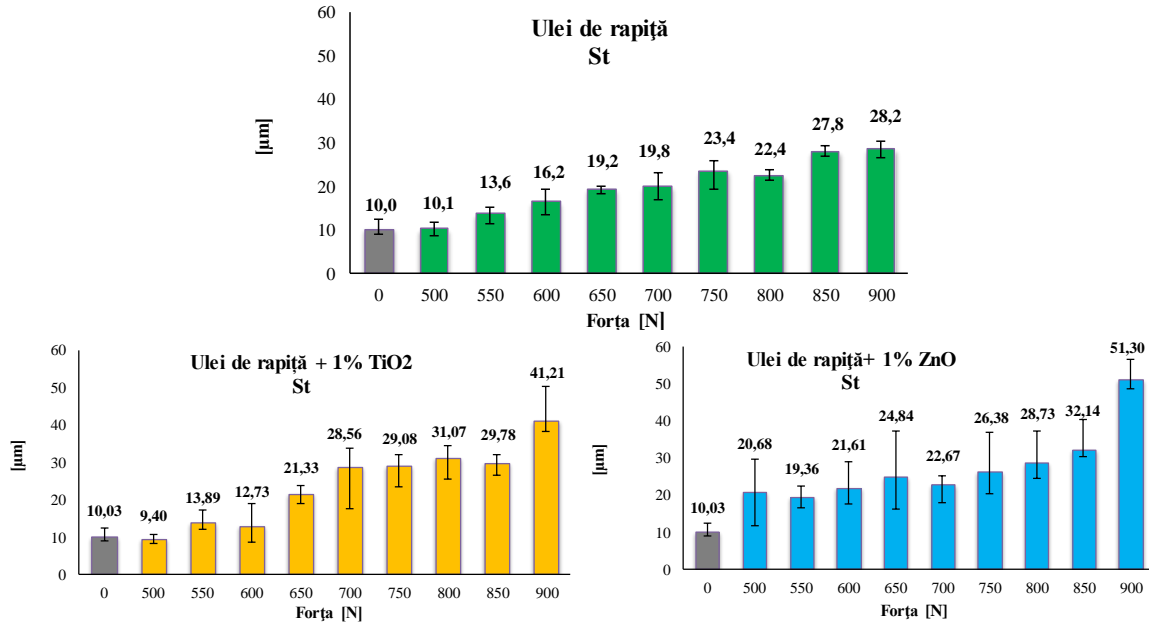


Fig. 6.13. Evoluția parametrului St în regimul sever de lucru

Analiza parametrilor funcționali 3D în regimul sever de lucru

În comparație cu regimul normal, suma parametrilor funcționali din regimul sever (Fig. 6.14) este mult mai mare pentru lubrifianții aditivați la sarcini mari.

Se vede o schimbare a ponderii parametrilor în sensul că Spk este mai mare comparativ cu Sk. Textura are un miez de rezistență relativ mic față de zona asperităților înalte și subțiri, iar Svk se modifică substanțial la 1% ZnO. Saltul denotă trecerea la un alt regim de uzură, posibil gripare.

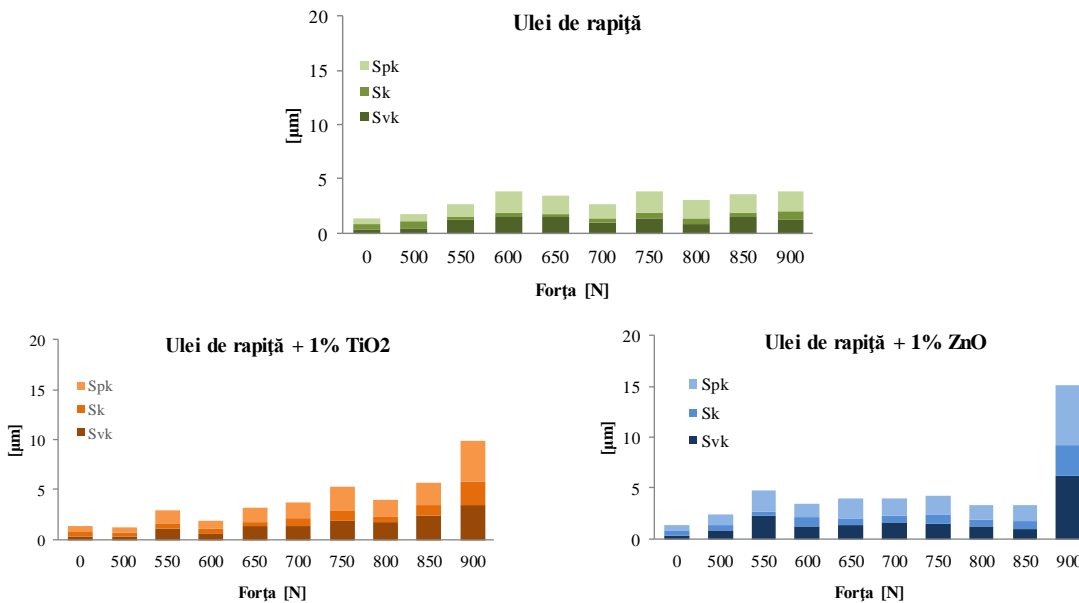


Fig. 6.14. Suma parametrilor funcționali (Spk+ Sk+ Svk) pentru regimul sever de lucru

În sprijinul acestei constatări, Fig. 6.15 prezintă imaginile virtuale ale urmelor de uzură la sarcina de 500 N și 900 N în regimul sever.

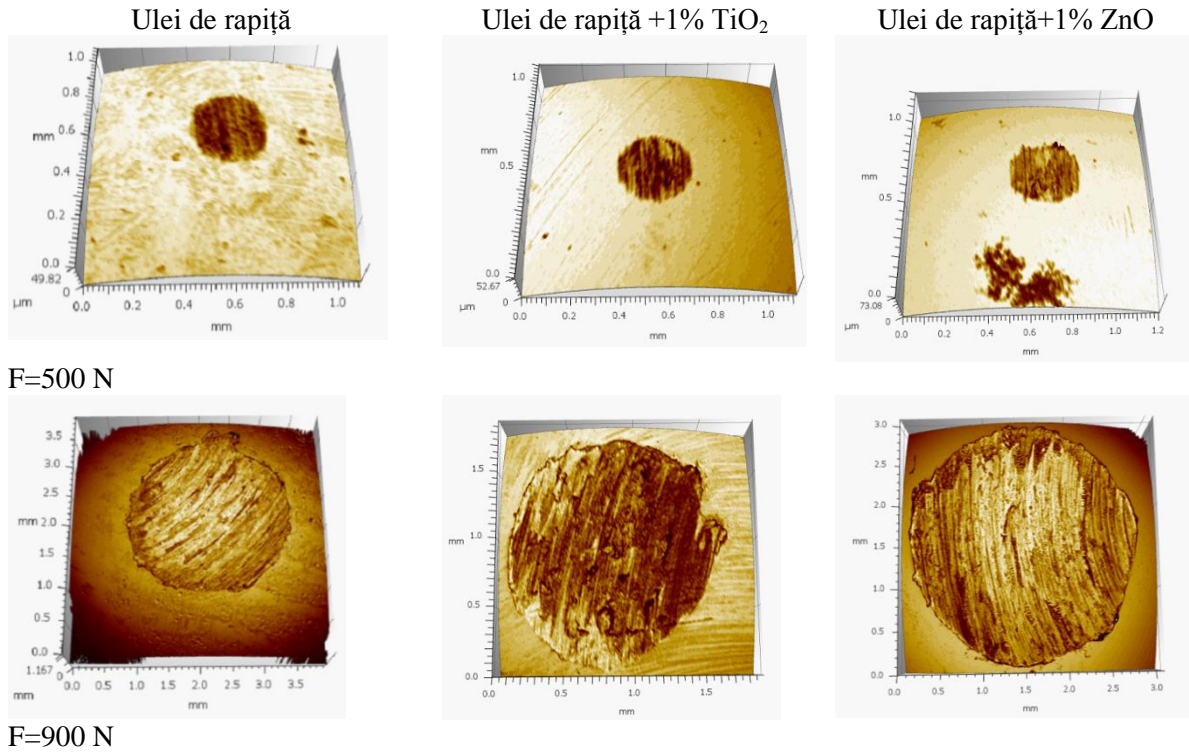


Fig. 6.15. Imagini virtuale ale urmelor de uzură

6.5. Analiza parametrilor 2D pentru suprafețele uzate ale bilelor în regim normal

6.5.1. Regimul normal de lucru

Parametri de amplitudine

Abaterea medie aritmetică a profilului, Ra [μm]

În Fig. 6.16 este prezentată evoluția parametrului 2D, abaterea medie aritmetică a profilului (Ra), pentru uleiul de rapiță neaditivat și aditivat cu 1% TiO₂ și 1% ZnO.

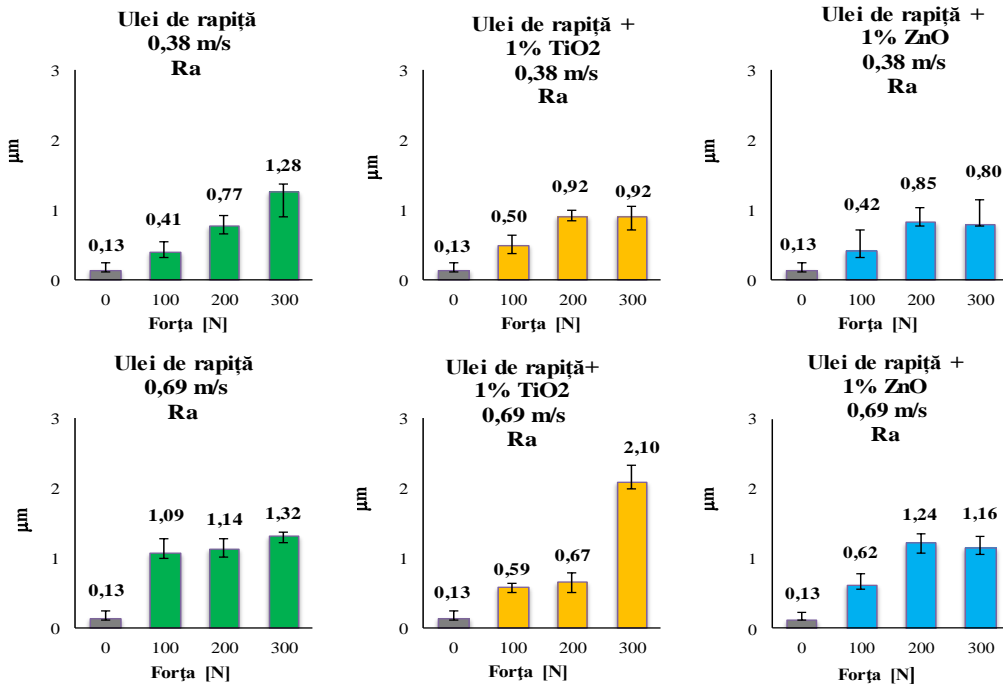


Fig. 6.16. Evoluția parametrului Ra, în regimul normal de testare

Pentru uleiul de rapiță neaditivat și pentru cel aditivat cu 1% TiO₂, se observă creșterea acestui parametru odată cu creșterea sarcinii. În cazul aditivării cu 1% ZnO, valoarea medie cea mai mică a lui

Ra o regăsim la forța cea mai mică, de 100 N. În schimb, valoarea maximă apare la forța de 200 N pentru toate vitezele de alunecare testate.

Înălțimea maximă a profilului, Rt [μm]

În Fig. 6.17, din graficele privind evoluția parametrului Rt, se observă creșterea valorilor medii ale parametrului odată cu sarcina. Valoarea maximă a acestui parametru se regăsește în cazul uleiului de rapiță aditivat cu 1% TiO_2 testat sub sarcina de 300 N și viteză de 0,69 m/s.

În regimul normal parametrul Rt crește brusc și substanțial pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% TiO_2 . Valorile cele mai mici ale lui Rt sunt înregistrate pentru uleiul de rapiță neaditivat, de unde se poate observa cum calitatea suprafeței nu este îmbunătățită de aditivare.

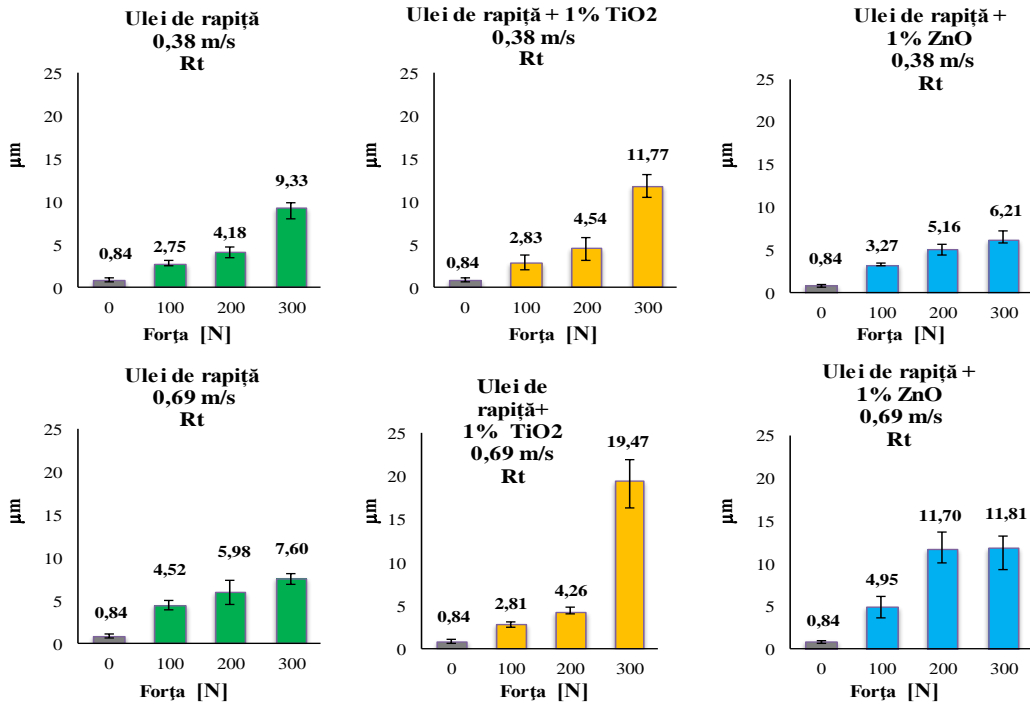


Fig. 6.17. Evoluția parametrului Rt

Analiza parametrilor funcționali 2D în regimul normal de lucru

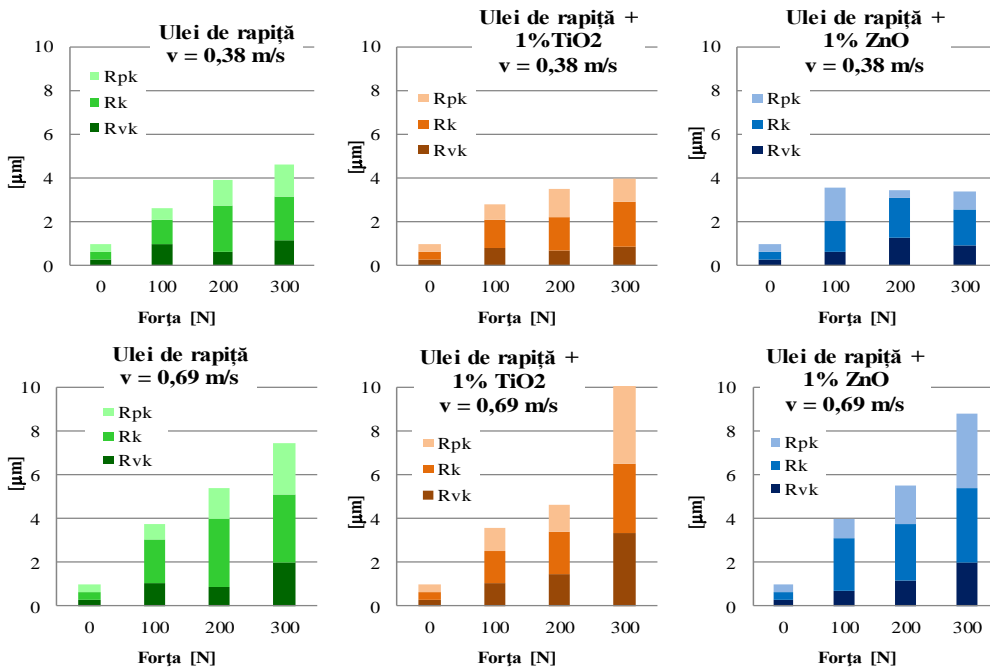


Fig. 6.18. Suma parametrilor funcționali 2D (Rpk+ Rk+ Rvk) în funcție de sarcină și viteză
În Fig. 6.18 parametri funcționali analizați sunt prezentați ca o sumă de factori (Rpk+ Rk+ Rvk).

Se observă că suma parametrilor funcționali pentru bila neuzată este mult mai mică decât suma parametrilor pentru bila uzată, pentru toate cazurile analizate, fapt ce ne duce cu gândul la faptul că uzura abrazivă a efectuat o remodelare asupra profilului.

Valori maxime ale sumei parametrilor funcționali se observă în cazul uleiului de rapiță aditivat cu 1% TiO₂, la forța de 300 N și viteza de 0,69 m/s. Valori minime ale sumei (Rpk+ Rk+ Rvk) se pot observa în cazul uleiului de rapiță aditivat cu 1% ZnO.

6.5.2. Analiza parametrilor 2 D în regimul sever de testare

Parametri de amplitudine 2D

Abaterea medie aritmetică a texturii profilului, Ra [μm]

În Fig. 6.19 se observă evoluția abaterii medii aritmetice a texturii profilului în regimul sever de lucru. Pentru lubrifianții aditivați se observă valoarea maximă atinsă a lui Ra (1,91 μm) pentru forța de 900 N. La forța de 800 N, pentru ambii lubrifianți aditivați, se observă o scădere a valorii lui Ra comparativ cu forța anterioară, dar la 850 N începe să crească. Cele mai mici valori ale parametrului Ra au fost obținute pentru uleiul de rapiță neaditivat.

Evoluția lui Ra nu reflectă gradul de severitate cu care se mărește suprafața de uzură. Ra nu poate fi folosit pentru determinarea trecerii de la un regim la altul.

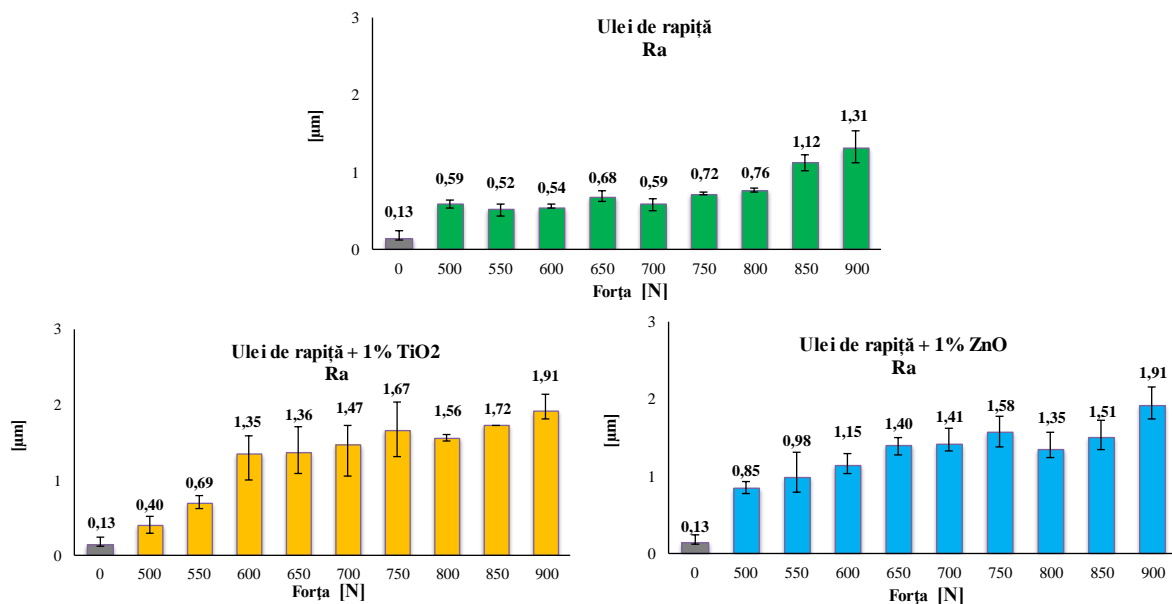


Fig. 6.19. Evoluția parametrului Ra în regimul sever de lucru

Înălțimea maximă a profilului, Rt [μm]

Evoluția înălțimii maxime a profilului este dată în Fig. 6.20. Parametrul Rt trebuie utilizat și interpretat cu mare atenție, deoarece are o anumită sensibilitate la vârfuri izolate și văi care ar putea fi ne semnificative. Cu toate acestea, Rt poate fi pertinent pe suprafețele care au fost filtrate în prealabil cu un filtru λs care permite trecerea frecvențelor joase.

Parametrul Rt are tendința să crească la sarcini foarte mari, așa cum crește și urma de uzură.

Pentru uleiul de rapiță neaditivat Rt crește la 850 N.

Pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% TiO₂ diferența mare este între 600 N și 700 N.

La aditivarea uleiului de rapiță cu 1% ZnO, Rt crește între 850 N și 900 N, ceea ce înseamnă că ZnO ar semnala mai clar intrarea într-un regim foarte sever, spre gripare.

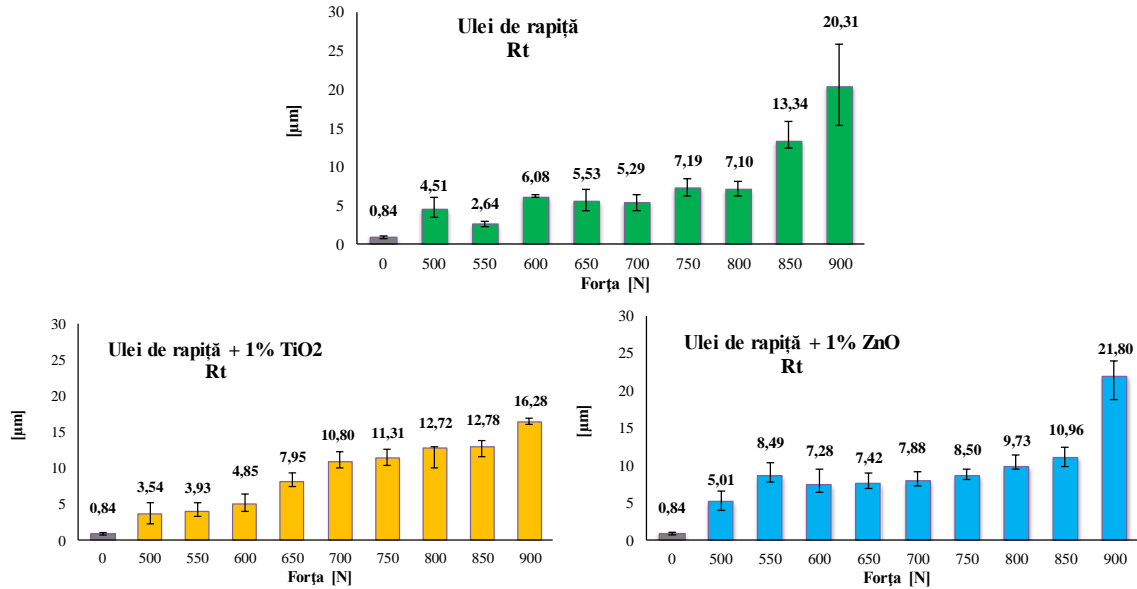


Fig. 6.20. Evoluția parametrului Rt în regimul sever de lucru

Analiza parametrilor funcționali 2D în regimul sever de lucru

În Fig. 6.21 este prezentată suma parametrilor funcționali 2D ai profilului ($Rpk + Rk + Rvk$) pentru regimul sever de testare.

Se observă că suma parametrilor funcționali pentru bila neuzată a dat cea mai mică valoare.

Pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% TiO_2 , suma parametrilor se păstrează constantă, ceea ce ne poate duce la concluzia că aditivul oferă o protecție suprafeței.

Valori mai mari ale acestei sume de parametri funcționali s-au obținut în cazul aditivării uleiului de rapiță cu 1% ZnO , la 850 N și 900 N.

La uleiul de rapiță neaditivat s-au obținut valori fluctuante ale sumei parametrilor funcționali pe tot parcursul testului.

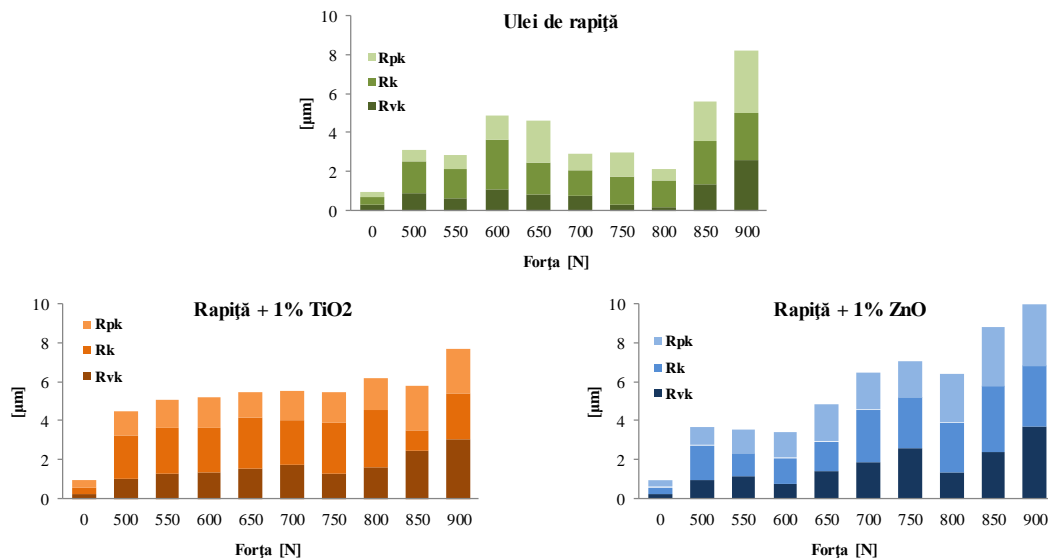


Fig. 6.21. Suma parametrilor funcționali ($Rpk + Rk + Rvk$) în regimul sever

6.6. Analiza Curbelor Abbott-Firestone pentru suprafețele urmelor de uzură în regim normal

Folosirea curbei Abbott-Firestone este o metodă importantă de caracterizare a suprafeței, mai ales atunci când se lucrează cu suprafețe în care este necesar să se introducă caracteristici specifice

legate de integritatea suprafeței și cerințe funcționale pentru anumite aplicații, unde se caută caracteristici tribologice specifice, caracterizate prin distribuția vârfurilor și văilor.

În Fig. 6.22 este prezentată o comparație între forma curbelor Abbott-Firestone pentru regimurile extreme testate.

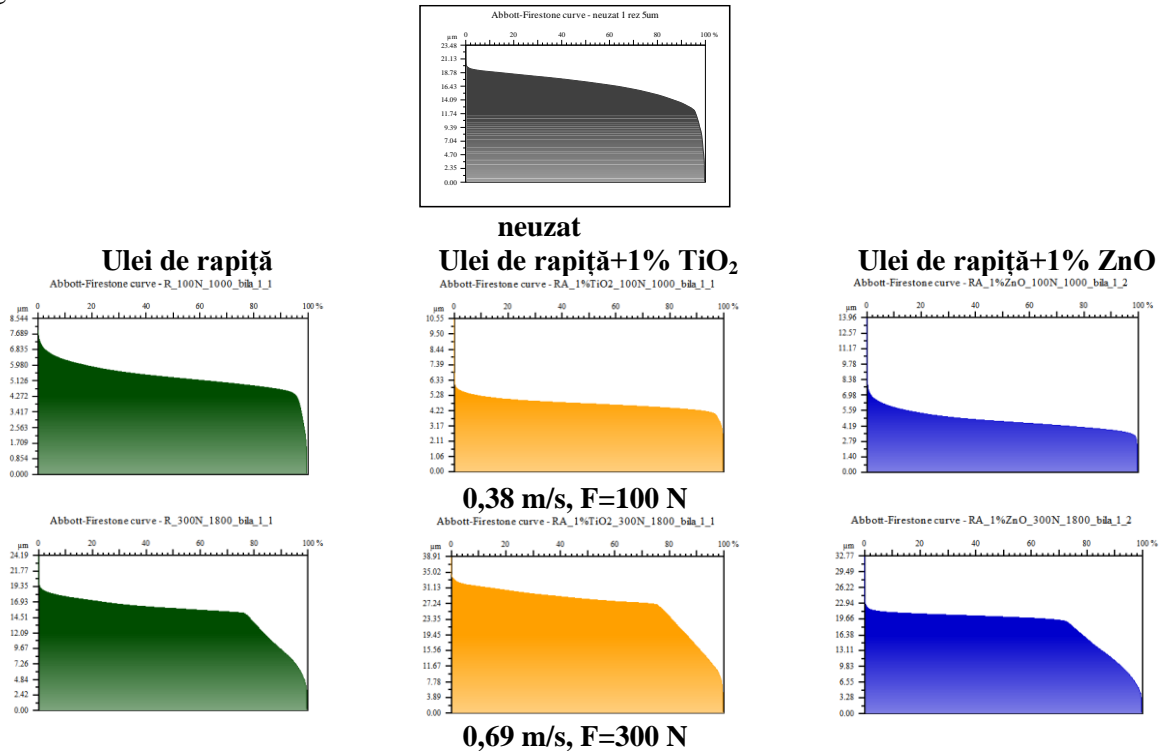


Fig. 6.22. Comparație între forma curbelor Abbott-Firestone pentru regimurile extreme testate

6.7. Corelația între parametrii de uzură și parametrii texturii

Diametrul urmei de uzură (WSD) și abaterea medie aritmetică a suprafeței (Sa)

Figura 6.23 prezintă corelația dintre WSD și Sa, reprezentată grafic.

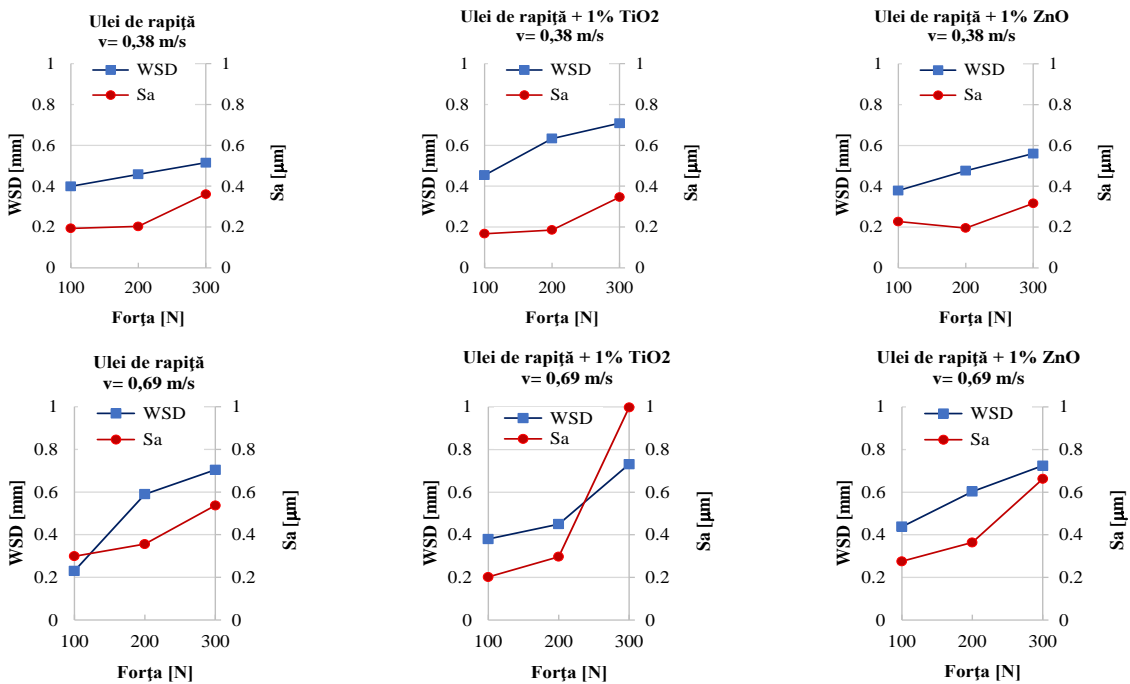


Fig. 6.23. Corelația între diametrul urmei de uzură și abaterea medie aritmetică Sa

Aceste grafice sunt rar folosite în tehnică, deoarece necesită un volum de informații foarte mare, dar ajută la stabilirea influenței parametrului asupra evoluției calității suprafeței.

Există parametri care evoluează la fel ca WSD-ul, iar alții care sunt mai puțin sensibili cu acesta din urmă.

Din datele obținute în teză se observă că parametrul de rugozitate Sa are tendința să urmărească WSD- ul, atât pentru uleiul de rapiță neaditivat, cât și pentru uleiurile aditivate. Valori mari ale WSD și Sa s-au obținut pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1% TiO₂ la forța F=300 N.

6.8. Concluzii privind studiul texturii urmelor uzate

Tribologii sunt interesați de funcții de forma $f(v, F, t, WSD, \text{parametrul texturii})=0$, din care să se poată evalua o optimizare sau o delimitare a regimului de lucru pe criterii de uzură și calitate a suprafeței.

În concluzie când se face comparație între suprafețele uzate și suprafețele inițiale neuzate curbe, este recomandat să se aibă în vedere suprafețe similare ca mărime (și ca geometrie).

Concluziile care se desprind în urma acestui studiu sunt:

- încărcarea pe bilă nu este uniformă,
- procesul de uzură este uniform pe bilele dela un test, deoarece forma curbelor Abbott-Firestone este similară pentru toate cele 3 bile,
- la sarcini mici uzura este mai mult pe vârful profilului,
- pentru a evalua calitatea unei suprafețe cât mai aproape de realitate, cu ajutorul parametrilor 3D, pasul profilometrului trebuie sa fie cât mai fin, iar zona de investigație cât mai mare.

Capitolul 7

Concluzii și contribuții personale

7.1. Concluzii finale

Adaosul de nanoparticule (TiO_2 , ZnO) ca modificatori ai frecării și uzurii, poate îmbunătăți proprietățile tribologice ale uleiurilor vegetale. Frecarea nu este întotdeauna redusă, dar creșterea coeficientului de frecare este acceptabilă deoarece este însoțită de o reducere substanțială a uzurii. Atenția trebuie să se concentreze asupra dispersiei nanoaditivului și a selecției dispersantului.

Rezultatele raportate sunt satisfăcătoare, dar trebuiesc extinse pe regimuri de lucru mai apropiate de cele aplicative.

Printre problematicile aditivării uleiului de rapiță cu nanoaditivi pentru reducerea frecării și uzurii se numără :

- formularea unor lubrifianți aditivați pe bază de ulei de rapiță și păstrarea unei dispersii omogene de nanoparticule,

- din acest studiu s-a evidențiat faptul că răspunsul lubrifiantului poate fi calitativ, foarte diferențiat în funcție de regimul de testare. Din rezultatele obținute s-a evidențiat faptul că nanoaditivarea uleiului de rapiță cu TiO_2 și ZnO a redus rata de uzură a diametrului mediu al urmei de uzură numai la sarcini și viteze mari, deci influența în regim normal a fost redusă, dar în regimul sever influența aditivului s-a dovedit benefică, în sensul măririi lungimii cu pantă mică a curbei diametrului mediu al urmei de uzură (WSD)-sarcină (F),

- raportarea rezultatelor favorizează compararea datelor cu cele din literatura de specialitate și formularea unor recomandări pertinente pentru lubrifianții formulați de autor,

- în urma acestui studiu, se poate concluziona că aditivarea uleiului de rapiță cu TiO_2 și ZnO ar fi eficace pentru sisteme care funcționează cu sarcini variabile și cu posibile variații mari de regim (spre regimul sever).

Modelul propus de autor introduce alunecarea pe un sistem simplificat al mașinii cu patru bile ca efort de forfecare între suprafețele în mișcare, după legea lui Coulomb ($\tau_f = \mu \cdot F_n$) și a considerat drept criteriu de similitudine între model și sistemul real, valoarea apropierei pe direcția z a celor două bile ca fiind aceeași pe model cu cea din sistemul real.

În acest model nu este simulată uzura bilelor și suprafețele sunt perfect netede, dar în realitate uzura abrazivă domină în regimul normal, în regimul sever fiind predominante procese de deformare plastică (vizibile și în simulare) și uzura adezivă care nu este evidențiată prin simulare.

Pe baza documentației făcute de autor asupra aditivării uleiurilor vegetale cu modificatori ai frecării și uzurii, autorul a ales uleiul de rapiță brut ca ulei de bază și ca modificatori de frecare și uzură TiO_2 și ZnO . Autorul acestui studiu a preluat tehnologia de amestecare/dispersie a nanoparticulelor din lucrări anterioare [16], [30], realizate în cadrul Centrului de Cercetare ”Mecanica și Tribologia Straturilor Superficiale” din cadrul Universității „Dunărea de Jos” din Galați.

Formularea lubrifianților nanoaditivați s-a bazat pe un regim de sonicare și de răcire alternativă repetat de câteva ori (3-5 ori), după care, lubrifiantul obținut cu concentrații diferite de aditiv a fost supus unei campanii de testare. Spre deosebire de multe alte rapoarte științifice referitoare la testarea lubrifianților, în care se pune accentul pe un singur regim de testare, această teză a avut ca obiectiv testarea lubrifianților nou formulați atât în regim normal, cât și în regim sever. Această abordare nouă a făcut posibilă evidențierea rolului nanoaditivilor în regimul sever în care, deși nu au format o peliculă continuă au dus totuși la protejarea suprafețelor de contact și la reducerea parametrului WSD, caracteristic testelor pe mașina cu 4 bile.

S-au analizat patru parametri tribologici, coeficientul de frecare, diametrul urmei de uzură, rata de uzură a diametrului urmei de uzură și temperatura în baia de ulei, pentru a avea o imagine cât mai clară a comportării lubrifianților testați.

În regimul normal se constată că:

- pentru uleiul de rapiță neaditivat, coeficientul de frecare este mai puțin sensibil la sarcină la viteze mari. Aditivarea uleiului de rapiță cu TiO_2 , face ca valorile coeficientului de frecare să fie mai mici decât în cazul uleiului de rapiță neaditivat, la $F=100$ N. La viteză mare se poate observa o creșterea valorilor coeficientului de frecare, ceea ce înseamnă că se formează peliculă. În cazul aditivării uleiului de rapiță cu nanoparticule de ZnO, se observă că, la concentrații mici nanoparticulele de ZnO cresc valoarea coeficientului de frecare,

- diametrul urmei de uzură în cazul uleiului de rapiță neaditivat crește odată cu creșterea sarcinii și a vitezei de alunecare. WSD-ul crește odată cu creșterea forței, valori mari ale WSD obținându-se la aditivarea uleiului de rapiță cu TiO_2 la concentrații de 0,25% și 1%. Influența aditivului asupra uzurii este benefică, în special la viteză de alunecare mică, 0,38 m/s, ceea ce înseamnă că sub această viteză, particulele rămân în contact și protejează suprafața. Urmele de uzură cresc odată cu creșterea sarcinii, la sarcinile cele mai mari avem și cele mai mari urme de uzură pentru cazul aditivării cu nanoparticule de ZnO. După efectuarea testelor și prelucrarea datelor experimentale se observă că aditivarea cu nanoparticule de ZnO la toate concentrațiile (0,25%, 0,5% și 1%) nu modifică diametrul urmei de uzură,

- se observă o scădere a ratei de uzură, în cazul uleiului de rapiță neaditivat, odată cu creșterea sarcinii și vitezei de alunecare a bilei rotitoare pe cele trei bile staționare. Pentru uleiul de rapiță aditivat cu TiO_2 se observă o scădere a $w(\text{WSD})$, odată cu sarcina, pentru toate concentrațiile și vitezele, pentru lubrifiții aditivăți. În cazul aditivării uleiului de rapiță cu ZnO, se poate observa că rata de uzură a diametrului urmei de uzură are o tendință de scădere odată cu creșterea sarcinii.

- pentru toți lubrifiții testați se constată o creștere a valorilor temperaturii în baia de ulei pe toată durata testării, odată cu creșterea sarcinii.

În regimul sever se observă următoarele :

- la uleiul de rapiță se observă variații mari ale coeficientului de frecare până în secunda 15 a testului, după care valorile nu mai au variații mari. Acest lucru înseamnă că distrugerea suprafeței sau procesele bruște care apar la sarcini mari apar în prima perioadă a testului, nu spre final. Se observă că adăugarea aditivului la regimul sever a mărit coeficientul de frecare, în cazul aditivării cu nanoparticule de TiO_2 . Coeficientul de frecare, pentru uleiul de rapiță aditivat cu nanoparticule de ZnO, are valori foarte mari la începutul testului, după care se duce spre valoarea de 0,1, ceea ce înseamnă un regim de frecare mixtă,

- se observă valori foarte mari ale diametrului urmei de uzură, (~2,7 mm), pentru uleiul de rapiță neaditivat și pentru uleiul de rapiță aditivat cu 0,5% TiO_2 . Ultima valoare pentru WSD este măsurată pentru 900 N, iar între 850 N și 900 N panta fiecărui lubrifiant este diferită. Cel mai bun comportament tribologic îl are lubrifiantul cu 1% ZnO,

- cele mai mici valori ale temperaturii din baia de ulei obținute la finalul testului de 1 minut, în regimul sever, o are uleiul de rapiță neaditivat (între 30 °C- 40 °C). Cea mai mare temperatură din baia de ulei la finalul testului a fost înregistrată pentru uleiul de rapiță aditivat cu 1%ZnO (a depășit 70 °C). Trebuie luat în considerare faptul că în cazul sarcinilor mari, chiar și accidental, temperatura va crește, iar sistemul de răcire al dispozitivului trebuie să mențină temperatura sub valoarea temperaturii de oxidare a uleiurilor vegetale (~140 °C).

Asocierea uzurii cu calitatea suprafeței poate fi calitativă, prin imagini și aspect al curbei Abbott-Firestone, dar și cantitativă, prin valorile obținute și prin funcția de dependență dintre ele.

Tribologii sunt interesați de funcții de forma $f(v, F, t, \text{WSD}, \text{parametrul texturii})=0$, din care să se poată evalua o optimizare sau o delimitare a regimului de lucru pe criterii de uzură și calitate a suprafeței.

În concluzie, când se face comparație între suprafețele uzate și suprafețele inițiale neuzate curbe, este recomandat să se aibă în vedere suprafețe similare ca mărime (și ca geometrie).

Pentru a evalua calitatea unei suprafețe cât mai aproape de realitate cu ajutorul parametrilor 3D, pasul profilometrului trebuie să fie cât mai fin, iar zona de investigație cât mai mare.

7.2. Contribuții personale

Luând în considerare faptul că scopul acestei cercetări a fost să evalueze, din punct de vedere tribologic influența nanoaditivilor TiO_2 și ZnO în uleiul de rapiță, autorul a realizat următoarele contribuții:

- studierea unei documentații cu referire la uleiurile vegetale, în special cu referire la uleiul de rapiță și la modificatori de frecare și uzură, (oxizi metalici),
- crearea unei metodologii proprii prin care s-au evaluat lubrifianții formulați pe baza uleiului de rapiță și a doi nanoaditivi, prin proiectarea unei campanii de testare care a inclus atât regimul normal, cât și regimul sever, aspect care nu este întâlnit în literatura de specialitate,
- formularea lubrifianților, la nivel de laborator, pentru a se asigura dispersia nanoparticulelor de aditiv,
- evaluarea comportării tribologice a lubrifianților formulați pe bază de ulei de rapiță și nanoaditivi printr-un set de parametri, încuzând: coeficientul de frecare, diametrul urmei de uzură, rata de uzură a diametrului urmei de uzură, temperatura în baia de lubrifiant,
- ierarhizarea lubrifianților formulați în funcție de parametrii tribologici.

7.3. Direcții de cercetare ulterioare

Pe baza rezultatelor obținute, cercetarea se poate continua pe următoarele direcții:

- mărirea domeniilor de testare pentru forța aplicată și viteză,
- folosirea altor metode de investigație pentru explicarea comportării tribologice a acestor lubrifianți,
- aditivarea complexă a uleiului de rapiță (introducerea în testare a unui set de aditivi modificatori ai frecării și uzurii).

Bibliografie

1. Abdullah, M. I. H. C., bin Abdollah, M. F., Tamaldin, N., Amiruddin, H., & Nuri, N. R. M. (2016). Effect of hexagonal boron nitride nanoparticles as an additive on the extreme pressure properties of engine oil. *Industrial Lubrication and Tribology*, 68(4), 441-445
2. Adhvaryu, A., Erhan, S. Z., & Perez, J.M. (2004). Tribological studies of thermally and chemically modified vegetable oils for use as environmentally friendly lubricants. *Wear*, 257, 359–367
3. Aldana, P.U., Dassenoy, F., Vacher, B., Le Mogne, T., & Thiebaut, B. (2016). WS2 nanoparticles anti-wear and friction reducing properties on rough surfaces in the presence of ZDDP additive. *Tribology International*, 102, 213–221
4. Ali, M. K. A., Xianjun, H., Mai, L., Bicheng, C., Turkson, R. F., & Qingping, C. (2016). Reducing frictional power losses and improving the scuffing resistance in automotive engines using hybrid nano materials as nano-lubricant additives. *Wear*, 364-365, 270–281
5. Ali, M. K. A., Xianjun, H., Mai, L., Qingping, C., Turkson, R. F., & Bicheng, C. (2016). Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al₂O₃ and TiO₂ nanomaterials as nano-lubricant additives. *Tribology International*, 103, 540–554
6. Alves, S. M., Barros, B. S., Trajano, M. F., Ribeiro, K. S. B., & Moura, E. (2013). Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions. *Tribology International*, 65, 28–36
7. Bakunin, V. N., Suslov, A. Y., Kuzmina, G. N., & Parenago, O. P. (2005). Recent achievements in the synthesis and application of inorganic nanoparticles as lubricant components. *Lubrication Science*, 17, 127
8. Bakunin, V. N., Suslov, A. Y., Kuzmina, G. N., Parenago, O. P., & Topchiev, A. V. (2004). Synthesis and application of inorganic nanoparticles as lubricant components – a review. *Journal of Nanoparticle Research*, 6, 273
9. Biresaw, G., Bantchev, G. B., & Cermak, S. C. (2011). Tribological properties of vegetable oils modified by reaction with butanethiol. *Tribology Letters*, 43, 17–32
10. Blateyron, F. (2013). *Characterisation of Areal Surface Texture* (Richard Leach, Ed.) doi: 10.1007 / 978-3-642-36458-7_2
11. Blunt, L., & Jiang, X. (2003). *Advanced techniques for assessment surface topography*, Butterworth-Heinemann, London
12. Cermak, S.C., Biresaw, G., Isbell, T.A., Evangelista, R.L., Vaughn, S.F., & Murray, R. (2013). New crop oils—Properties as potential lubricants. *Industrial Crops and Products*, 44, 232–239
13. Charoo, M. S., Wani, M. F., Hanief, M., & Rather, M. A. (2017). Tribological properties of MoS₂ particles as lubricant additive on EN31 alloy steel and AISI 52100 steel ball. *Materials Today: Proceedings*, 4, 9967–9971
14. Crețu, S. S. (2009). *Contactul concentrat elastic-plastic*, Editura Politehnică, Iași, România
15. Cristea, G. C., Georgescu, C., Dima, D., & Deleanu, L. (2018, June 7-8). Influence of graphene as additive in soybean oil [Conference presentation] 8th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering – ACME 2018, Iași, Romania
16. Cristea, G. C. (2017). *Tribological characterization of soybean oil additivated with nano materials based on carbon (black carbon, graphite and graphene)*, [Doctoral dissertation, „Dunărea de Jos” University of Galați, Romania]

17. Czichos, H., Saito, T., & Smith, L. (2006). *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*, Springer Science-Business Media, Berlin
18. Dai, W., Kheireddin, B., Gao, H., & Liang, H. (2016). Roles of nanoparticles in oil lubrication. *Tribology International*, 102, 88–98
19. Deleanu, L., Cantaragiu, A., Bîrsan, I. G., Podaru, G., & Georgescu, C. (2011). Evaluation of the spread range of 3D parameters for coated surfaces. *Tribology in Industry*, 33(2), 72-78
20. Deleanu, L., Georgescu, C., & Suciuc, C. (2012). A comparison between 2D and 3D surface parameters for evaluating the quality of surfaces. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati*, V, Technologies in Machine Building, 10-17
21. Dong, W. P., Sullivan, P. J., & Stout, K. J. (1994). Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography. III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties. *Wear*, 178(1-2), 29-43
22. Dowson, D., & Higginson, G.R. (1977). *Elasto-hydrodynamic lubrication*, Pergamon Press, Oxford
23. Dowson, D., Priest, M., Taylor C., M., Ehret, P., Childs, T., Dalmaz, G., Berthier, Y., Flamand, L., Georges, J.-M., & Lubrecht, A. (1999). *Lubrication at the frontier. The role of the interface and surface layers in the thin film and boundary regime*. Elsevier Science
24. Erhan, S. Z. (2005). *Industrial Uses of Vegetable Oils*, AOCS Press, Peoria, Illinois.
25. Erhan, S. Z., Sharma, B. K., & Perez, J. M. (2006). Oxidation and low temperature stability of vegetable oil-based lubricants. *Industrial Crops and Products*, 24, 292–299
26. Fiebig, H.J. (2011). *Fatty acid composition of important plant and animal fats and oils*, Münster. <http://www.dgfett.de/material/fszus.php>
27. Frunză, G., & Spînu, S. (2010). *Fundamentele teoriei plasticității. Aplicații în mecanica contactului elasto-plastic*, Editura Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava, România. ISBN 978-973-666-336-9
28. Gangwani, P., Gupta, M. K., & Bijwe, J. (2017). Synergism between particles of PTFE and hBN to enhance the performance of oils. *Wear*, 384-385, 169–177
29. Georgescu, C., Cristea, G. C., Solea, C. L., Deleanu, L., & Sandu, I. G. (2018). Flammability of Some Vegetal Oils on Hot Surface. *Revista de chimie*, 69(3), 668-673
30. Georgescu, C., Șolea, L. C., Cristea, G. C., & Deleanu, L. (2015). On the lubrication capability of rapeseed oil. *Recent Advances in Mechanics and Materials in Design*, 5533, Ponta Delgada, Azores, Portugal
31. Georgescu, C. (2012). *Stratul superficial în procesele de frecare și uzură ale unor materiale compozite cu matrice de polibutilentereftalat* [Doctoral dissertation, „Dunărea de Jos” University of Galați, Romania
32. Gold, P.W. (2002). *Basics of Tribology (Lectures Notes)*, Institut für Maschinenelemente (IME) der RWTH-Aachen
33. Gow, G. (2009). *Lubricating Grease In: Chemistry and Technology of Lubricants*, 3rd edition, (Mortimer R, Fox M Orszulik S, Ed.), Springer, Dordrecht
34. Gu, K., Chen, B., Wang, X., Wang, J., Fang, J., Wu, J., & Huan, L. (2014). Preparation, friction and wear properties of hydrophobic lanthanum borate nanorods in rapeseed oil. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 3578–3584
35. Gulzar, M., Masjuk, H. H., Varman, M., Kalam, M. A., Mufti, R. A., Zulkifli, N. W. M., Yunus, R., & Zahid, R. (2015). Improving the AW/EP ability of chemically modified palm oil by adding CuO and MoS₂ nanoparticles. *Tribology International*, 88, 271–279

36. Guo, Y., B. (2002). Mechanical Properties of Hardened AISI 52100 Steel in Hard Machining Processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124(1), 1-9. <https://doi.org/10.1115/1.1413775>
37. Habereeder, T., Moore, D., & Lang, M. (2008). *Eco Requirements for Lubricant Additives in Lubricant Additive Chemistry and Applications*, 2nd edition, Chapter 26, (Rudnick, L R ,Ed.) CRC Press, Boca Raton
38. Hardy, C., Baronet, C. N., & Tordion, G. V. (1971). The elasto-plastic indentation of a half-space by a rigid sphere. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 3(4), 451-462
39. Ilie, F., & Covaliu, C. (2016). Tribological properties of the lubricant containing titanium dioxide nanoparticles as an additive. *Lubricants*, 4, 12
40. Ingole, S., Charanpahari, A., Kakade, A., Umare, S., S., Bhatt, D., V., & Menghani, J. (2013). Tribological behavior of nano TiO₂ as an additive in base oil. *Wear*, 301, 776-785
41. Ionescu, T. F., Guglea, D., Georgescu, C., Dima, D., & Deleanu, L. (2020). Influence of ZnO concentration in rapeseed oil on tribological behavior. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 724(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/724/1/012045>
42. Ionescu, T. F., Guglea, D., Georgescu, C., Dima, D., & Deleanu, L. (2020). Rapeseed oil with anti-wear additives on the four ball tester. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 997. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/997/1/012013>.
43. Ionescu, T.F., Guglea, D., Deleanu, L., Alexandru, P., & Georgescu, C. (2019). Tribological behavior of coarse rapeseed oil additivated with nanoparticles of Zinc oxide. *Proceedings on Engineering Sciences*, 1(1). doi: 10.24874/PES01.01.002
44. Ionescu, T.F., Șorcaru, A.A., Guglea, D., Cristea, G.C., Georgescu, C., & Deleanu, L. (2020). Rapeseed oil additivated with hexagonal boron nitride. *INCAS BULLETIN*, 12, 63-72. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2020.12.2>
45. Ionescu, T.F., Șolea, L.C., Guglea, D., Georgescu, C., & Deleanu, L. (2019). Evaluating seizure on four ball tester for rapeseed oil. *Mechanical Testing and Diagnosis*, IX(3), 18-23
46. Ionescu, T.F., Cristea, G.C., Guglea, D., Dima, D., Georgescu, C., & Deleanu, L. (2020, November 26-27). Wear-load curves in severe regime for rapeseed oil additivated with ZnO. 8th International Conference on Material Science and Technologies – ROMat 2020, Bucharest, Romania
47. Jatti, V., & Kumar, V. (2015). Titanium oxide nano-particles as anti-wear and friction-reduction additives in lubricating oil. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(4), 1049-1055
48. Johnson, K., L., Greenwood, J., A., & Higginson, J.,G. (1985). The contact of elastic regular wavysurfaces. *Int J Mech Sci*, 27(6), 383–396
49. Karthik, V. S. N. (2012). Finite element analysis of spherical indentation to study pile-up/sink-in phenomena in steels and experimental validation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 54, 74-83
50. Kudish, I. I., & Covitch, M. J. (2010). *Modeling and Analytical Methods in Tribology*, CRC Press
51. Kurth, T. L., Byars, J. A., Cermak, S. C., Sharma, B. K., & Biresaw, G. (2007). Non-linear adsorption modeling of fatty esters and oleic estolide esters via boundary lubrication coefficient of friction measurements. *Wear*, 262(5–6), 536–44
52. Laad, M., Kumar, V., & Jatti, S. (2018). Titanium oxide nanoparticles as additives in engine oil. *Journal of King Saud University- Engineering Sciences*, 30, 116-122

53. Liu, Z., Sharma, B. K., Erhan, S. Z., Biswas, A., Wang, R., & Schuman, T. P. (2015). Oxidation and low temperature stability of polymerized soybean oil-based lubricants. *Thermochimica Acta*, 601, 9-16
54. Luna, F. M. T., Rocha, B. S., Rola Jr., E. M., Albuquerque, M. C.G., Azevedo, D. C. S., & Cavalcante Jr., C. L. (2011). Assessment of biodegradability and oxidation stability of mineral, vegetable and synthetic oil samples. *Industrial Crops and Products*, 33, 579–583
55. Malburg, M. C. (2002). Cylinder Bore Surface Texture Analysis, Digital Metrology Solutions Inc. <http://www.digitalmetrology.com/Papers/CylinderBoreNoBkgd.pdf>
56. Mariano, G. (2009). *Selection and application of solid lubricants as friction modifiers in Lubricant Additives*, (Rudnick, L. R., Ed.), 173
57. Meng, Y.; Su, F.; & Chen, Y. (2016). Supercritical Fluid Synthesis and Tribological Applications of Silver Nanoparticle-decorated Graphene in Engine Oil Nanofluid. *Sci. Rep.*, 6(31246)
58. Miller, M. (2008). *Additives for bioderived and biodegradable lubricants Lubricant Additive Chemistry and Applications*, 2nd edition, Chapter 18, (Rudnick L R, Erhan S. Z., Ed.), CRC Press, Taylor and Francis Group
59. Nazir, N. H., Zulfiqar, A. K., & Adil, S. (2018). Experimental analysis and modelling of c-crack propagation in silicon nitride ball bearing element under rolling contact fatigue. *Tribology International*, 126, 386-401
60. Norrby, T. (2003). Environmentally adapted lubricants – where are the opportunities? *Industrial Lubrication and Tribology*, 55(6), 268-274
61. Paredes, X., Comunasa, M. J. P., Pensado, A. S., Bazile, J.P., Boned, C., & Fernández, J. (2014). High pressure viscosity characterization of four vegetable and mineralhydraulic oils. *Industrial Crops and Products*, 54, (2014), 281–290
62. Pirvu, C., Georgescu, C., & Deleanu, L. (2013). Influence of grinding feed speed on 3D texture parameters. *Mechanical Testing and Diagnosis*, 2, 19-28
63. Quinchia, L. A., Delgado, M. A., Valencia, C., Franco, J .M., & Gallegos, C. (2010). Viscosity modification of different vegetable oils with EVA copolymer for lubricant applications. *Industrial Crops and Products*, 32, 607–612
64. Rakopoulos, D. C., Rakopoulos, C. D., Giakoumis, E. G., Dimaratos, A. M., & Founti, M. A. (2011). Comparative environmental behavior of bus engine operating on blends of diesel fuel with four straight vegetable oils of Greek origin: sunflower, cottonseed, corn and olive. *Fuel*, 90, 3439–3446
65. Rîpă, M., & Deleanu, L. (2006). Relevant parameters set for characterising engineered surface topography, Conferința Națională de Fizică Aplicată, Galați, România
66. Rudnick, L. R. (2009). *Lubricant additives. Chemistry and applications*, Second Edition, CRC Press, Taylor & Frances Group
67. Rudnick, L. R., & Erhan, S. Z. (2006). *Natural oils as lubricants in Synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants: chemistry and technology* (Rudnick L R, Erhan, S Z , Ed.) New York, CRC/Taylor & Francis Group
68. Sanukrishna, S. S., & Prakash, M., J. (2018). Experimental studies on thermal and rheological behaviour of TiO₂-PAG nanolubricant for refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 86, 356-372
69. Shahnazar, S., Bagheri, S., & Hamid, S. B. A. (2016). Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. *International journal of hydrogen energy*, 41, 3153-3170

70. Spikes, H. A. (2002). Film-forming additives-direct and indirect ways to reduce friction. *Lubrication Science*, 14, 147
71. Stachowiak, G. W., & Batchelor, A.W. (2005). *Engineering tribology*, Butterworth-Heinemann, Team Lrn.
72. Stachowiak, G. W., & Podsiadlo P. (2004). Classification of tribological surfaces. *Tribology International*, 37, 211-217
73. Stachowiak, G. W., & Podsiadlo, P. (2006). Fast classification of engineering surfaces without surface parameters. *Tribology International*, 39, 1624-1633
74. Stout, K. J., Sullivan, P. J., Dong, W. P., Mainsah, E., Luo, N., Mathia, T., & Zahouani, H. (1994). The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions, *Publication no. EUR 15178 EN of the Commission of the European Communities*: Brussels-Luxembourg
75. Sunqing, Q., Junxiu, D., & Guoxu, C. (1999). A review of ultrafine particles as antiwear additives and friction modifiers in lubricating oils. *Lubrication Science*, 11, 217
76. Syahrullai, S., Ani, F. H., & Golshkough, I. (2013). Wear resistance characteristic of vegetable oil. The 2nd International Conference on Sustainable Materials Engineering, Penang, Malaysia, 44-47
77. Şolea, L. C. (2013). *Contribuții la studiul comportării reologice și tribologice a unor lubrifianți biodegradabili pe bază de uleiuri vegetale* [Doctoral dissertation, „Dunărea de Jos” University of Galați
78. Tang, Z., & Li, S. (2017). A review of recent developments of friction modifiers for liquid lubricants (2007–present). *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 18, 119–139
79. Tarrago-Trani, M. T., Phillips, K. M., Lemar, L. E., & Holden, J. M. (2006). Review. New and existing oils and fats used in products with reduced trans-fatty acid content. Nutrient database. *Journal of the American Dietetic Association*, 24 (2006), 867-880
80. Thornton, C. (2015). *Granular Dynamics, Contact Mechanics and Particle System Simulations*, Springer International Publishing Switzerland, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18711-2>
81. Uflyand, I. E., Zhinzhiro, V., A., & Burlakova, V., E. (2019). Metal-containing nanomaterials as lubricant additives: State-of-the-art and future development. *Friction*, 7 (2), 93-116. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0261-y>
82. Wang, M. (2014). *Biolubricants and biolubrication*, [Doctoral dissertation KTH Royal Institute of Technology, Stockholm]
83. Wang, R., & Schuman, T. P. (2015). Oxidation and low temperature stability of polymerized soybean oil-based lubricants. *Thermochimica Acta*, 601, 9–16
84. Wu, H., Zhao, J., Xia, W., Cheng, X., He, A., Yun, J. H., Wang, L., Huang, H., Jiao, S., Huang, L., Zhang, S., & Jiang, Z. (2017). A study of the tribological behaviour of TiO₂ nanoadditive water-based lubricants. *Tribology International*, 109, 398–408
85. Wu, Y. Y., Tsui, W. C., & Liu, T. C. (2007). Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives. *Wear*, 262(7-8), 819–825
86. Xiao, H., & Liu, S. (2017). 2D nanomaterials as lubricant additive: A review. *Materials and Design*, 135, 319–332
87. Yan, S. L., & Li, L. Y. (2003). Finite element analysis of cyclic indentation of an elastic-perfectly plastic half-space by a rigid sphere. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 217, 505-514

88. You, J., Li, F., & Huang, Y. (2010). Tribological performance of two potential environmentally friendly ashless vegetable oil additives. *China Petroleum Processing and Petrochemical Technology*, 12(1), 43-48
89. Zhao, J., Kan, Q., Fu, P., Kang, G., & Wang, P. (2020). An Elasto-plastic Contact Solving Method for Two Spheres. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 33 (5), 612–634. <https://doi.org/10.1007/s10338-020-00164-1>
90. Zulkifli, N. W. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., & Yunus, R. (2013). Experimental analysis of tribological properties of biolubricant with nanoparticle additive. *Procedia Engineering*, 68, 152–157
91. *** Environmentally Acceptable Lubricants, United States Environmental Protection https://www3.epa.gov/npdes/pubs/vgp_environmentally_acceptable_lubricants.pdf
92. *** Mountains Lab Premium 8.1 Version (2020), disponibil on-line: <http://www.imagemetrology.com>.
93. *** International Organization of Standardization. (2012). (2012). Specificații geometrice pentru produse (GPS). Starea suprafeței: Areal. Partea 3: Operatori de specificație. (ISO Standard No. 25178-3:2012)
94. *** International Organization of Standardization (2003). Specificații geometrice pentru produse (GPS). Starea suprafeței: Metoda profilului. Termeni, definiții și parametri de stare ai profilului. (ISO Standard No. 4287:2003)

**Listă de lucrări elaborate de
drd. ing. Traian Florian Ionescu**

1. **Ionescu T. F.**, Guglea D., Georgescu C., Dima D., & Deleanu L.(2020). Influence of ZnO concentration in rapeseed oil on tribological behavior. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Romania, 724(1)*.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/724/1/012045>.
2. Guglea D., **Ionescu T. F.**, Dima D., Georgescu C., & Deleanu L. (2020). Tribological behavior of rapeseed oil additivated with boron nitride, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Romania, 724(1)*.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/724/1/012046>
3. **Ionescu T. F.**, Guglea D., Georgescu C., Dima D., & Deleanu L.(2020). Rapeseed oil with anti-wear additives on the four ball tester. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Romania, 997*.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/997/1/012013>.
4. Deleanu L., Georgescu C., **Ionescu T. F.**, Guglea D., & Isacescu D. (2020). SR EN ISO 20623 - A standard for tribological evaluation of lubricants that may bust innovation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Romania, 997*.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/997/1/012008>
5. **Ionescu T.F.**, Guglea D., Deleanu L., Alexandru P., & Georgescu C. (2019). Tribological behavior of coarse rapeseed oil additivated with nanoparticles of zinc oxide. *Proceedings on Engineering Sciences, Serbia, 1(1)*. doi: 10.24874/PES01.01.002.
6. **Ionescu T.F.**, Șorcaru A.A., Guglea D., Cristea G.C., Georgescu C., & Deleanu L. (2020). Rapeseed oil additivated with hexagonal boron nitride. *INCAS BULLETIN*, 12, 63-72.
<https://doi.org/10.13111/2066-8201.2020.12.2>
7. **Ionescu T.F.**, Șolea L.C., Guglea D., Georgescu C., & Deleanu L. (2019). Evaluating seizure on four ball tester for rapeseed oil. *Mechanical Testing and Diagnosis, IX (3)*.
<https://doi.org/10.35219/mtd.2019.3.03>
8. Guglea, D., **Ionescu, T. F.**, Dima, D., Georgescu, C., & Deleanu, L. (2020). Nano additivation of rapeseed oil with ZnO and BN. *Academia Forțelor Terestre „Nicolae Bălcescu” din Sibiu, Buletin științific supliment, Catalogul oficial al salonului „Cadet INOVA”-Cercetări și inovații în viziunea tinerilor cercetători*, 5, 281-285.
http://37.251.175.30/documente/Supliment_Inova_20.pdf
9. Guglea D., **Ionescu T.F.**, Deleanu L., Georgescu C., Dima D., & Ojoc G. G. (2019). Boron nitride as additive in rapeseed oil, tested on four ball tester. *Proceedings on Engineering Sciences, Serbia, 1(1)*. doi: 10.24874/PES01.01.076

10. **Ionescu T.F.**, Guglea D., Georgescu C., Dima D., & Deleanu L. (2019, October 16-18). *Influence of nano particles of ZnO as additive in rapeseed oil for evaluating the tribological behavior* [Conference presentation]. UGAL INVENT 2019, Galați, Romania. <http://www.invent.ugal.ro>
11. Guglea D., **Ionescu T.F.**, Dima D., Georgescu C., & Deleanu L. (2019, October 16-18). *Influence of nano particles of hBN as additive in rapeseed oil for evaluating the tribological behavior* [Conference presentation]. UGAL INVENT 2019, Galați, Romania. <http://www.invent.ugal.ro>
12. Deleanu, L., Georgescu, C., Șolea, L.C., **Ionescu, T.F.**, & Ojoc, G.G. (2019, October 16-18). *Manifold ignition test inter-lab study for ISO 20823* [Conference presentation]. UGAL INVENT 2019, Galați, Romania. <http://www.invent.ugal.ro>
13. Boțan, M., Mustață, A.E., **Ionescu, T.F.**, Georgescu, C., & Deleanu, L. (2017). Adding aramid fibres to improve tribological characteristics of two polymers. *Tribology in Industry*, 39(3), 283-293. doi: 10.24874/ti.2017.39.03.02
14. **Ionescu, T.F.**, Pîrvu, C., Georgescu, C., & Deleanu L. (2017, May 17-19). *The influence of friction characteristics in simulating the impact bullet- stratified materials* [Conference presentation]. SerbiaTrib 2017, Kragujevac, Serbia.
15. Pîrvu, C., **Ionescu, T.F.**, Deleanu, L., & Badea S. (2017). Simplified simulation of impact bullet- stratified pack for restraining ballistic tests. *MATEC Web of Conferences*, 112. doi:10.1051/mateconf/201711206023
16. **Ionescu, T.F.**, Pîrvu, C., Badea, S., Georgescu, C., & Deleanu L. (2017, October 19-20). *Simulation of the impact bullet- stratified materials* [Conference presentation]. UGAL INVENT 2017, Galați, Romania. <http://www.invent.ugal.ro>
17. **Ionescu T.F.**, Cristea G.C., Guglea D., Dima D., Georgescu C., & Deleanu L. (2020, November 26-27). Wear-load curves in severe regime for rapeseed oil additivated with ZnO [Conference presentation]. 8th International Conference on Material Science and Technologies – ROMat 2020, Bucharest, Romania
18. **Ionescu, T.F.**, Guglea, D., Deleanu, L., Alexandru, P., & Georgescu, C. (2019, June 13-14). *Tribological behavior of coarse rapeseed tested on four ball tester* [Conference presentation] Scientific Conference of Doctoral Schools SCDS-UDJG, Galați, Romania. <http://www.cssd-udjg.ugal.ro/index.php/2019/abstracts-2019>
19. **Ionescu T.F.**, Guglea D., Georgescu C., & Deleanu L. (2020, June 18-19). *Influence of nano-additive ZnO on wear load curve in severe regime* [Conference presentation] Scientific Conference Of Doctoral Schools – Perspectives and challenges in doctoral research. <http://www.cssd-udjg.ugal.ro/index.php/2020/abstracts-20201>